

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**IMPACTO DEL ESCURRIMIENTO ASOCIADO A EVENTOS DE PERCIPITACIÓN
EXTREMOS EN UNA CUENCA URBANA Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO Y USO
DEL SUELO.**

Por:

ING. SERGIO ESQUIVEL PUENTE

Como requisito parcial para obtener el grado de

MAESTRÍA EN CIENCIAS

Con Orientación en Ingeniería Ambiental

Director de Tesis:

Dr. Víctor Hugo Guerra Cobián

Noviembre del 2012

Síntesis ejecutiva

Esta investigación es de gran utilidad para conocer la magnitud del impacto de los eventos extremos de precipitación cuando se presentan en la cuenca debido al cambio y uso del suelo, específicamente de zona de vegetación a zona urbana, la cual inevitablemente sigue en constante crecimiento, afectando a la población que se localiza principalmente en los márgenes del cauce, tomando en cuenta también la falta de planeación y el incumplimiento de la ley de los asentamientos irregulares que invaden la zona federal.

Por tal motivo, se recomienda proponer obras estructurales tales como la construcción de muros de contención, colocación de gaviones, así como también la evaluación, rehabilitación y/o diseño de taludes, de acuerdo a los resultados obtenidos de recorridos de campo realizados a lo largo del río La Silla. Además, es importante la realización de inspecciones y evaluaciones en campo de puentes vehiculares sobre el río La Silla, con el fin de detectar en forma visual la presencia de fallas o riesgos estructurales en las condiciones actuales, estableciendo acciones de mejora, como por ejemplo: reparaciones leves en la estructura o reparación total, para cada uno de ellos.

Lista de figuras

| Figura | Descripción | Página |
|---------------|--|---------------|
| 1 | Discretización de la cuenca en el modelo CEQUeau. (Adaptación de Morin y Paquet, 2005) | 17 |
| 2 | Función de producción del modelo CEQUeau (Adaptación de Morin y Paquet, 1995) | 18 |
| 3 | Función de transferencia del modelo CEQUeau (Adaptación de Morin y Paquet, 1995) | 18 |
| 4 | Resultados gráficos del modelo CEQUeau | 25 |
| 5 | Tipos de estructuras de los MDE | 32 |
| 6 | Cuenca del Río La Silla | 35 |
| 7 | Región Hidrológica 24 “Río Bravo” (RH-24). | 36 |
| 8 | Cauce del Río la Silla | 36 |
| 9 | Tipos de clima en el Estado de Nuevo León | 38 |
| 10 | Zonas de tipos de vegetación de la cuenca del río La Silla | 39 |
| 11 | Secuencia de obtención de archivos necesarios para la modelación hidrológica empleando el modelo CEQUeau | 43 |
| 12 | Modelo Digital de Elevación (MDE) de la cuenca del Río La Silla | 45 |
| 13 | Imagen raster de ocupación de suelo reclasificada de la cuenca del Río La Silla. | 46 |
| 14 | Imagen vectorial del parteaguas de la cuenca del Río La Silla | 47 |

| Figura | Descripción | Página |
|---------------|---|---------------|
| 15 | Imagen vectorial de las estaciones meteorológicas (puntos verdes), ubicadas dentro y fuera del parteaguas de la cuenca (línea roja). | 48 |
| 16 | Imagen vectorial de la estación hidrométrica (punto verde), la cual representa el punto de análisis de la cuenca del Río La Silla (línea roja). | 49 |
| 17 | Secuencia de obtención de áreas de vegetación en cada cuadro que discretiza a la cuenca del río La Silla. | 53 |
| 18 | Secuencia para cargar los porcentajes de vegetación por cuadro realizado para cada año de estudio en la cuenca del río La Silla. | 54 |
| 19 | Secuencia para la preparación de archivos fisiográficos e hidrometeorológicos, así como para indicar el periodo de simulación en el modelo hidrológico CEQUeau. | 55 |
| 20 | Secuencia para realizar la simulación hidrológica, así como para la revisión de los resultados obtenidos dentro del modelo hidrológico CEQUeau. | 56 |
| 21 | Ubicación del Área Natural Protegida “Parque Nacional Cumbres de Monterrey”. | 60 |
| 22 | Discretización de la cuenca del río La Silla. | 62 |
| 23 | Resultados obtenidos al realizar la preparación de los archivos fisiográficos obtenidos por el módulo hidrogeomático. | 63 |
| 24 | Valores de los parámetros del modelo hidrológico CEQUeau, producto del empleo de la herramienta de optimización y de la técnica de prueba y error. | 64 |
| 25 | Imagen obtenida por ortofotografía de la Zona Metropolitana de Monterrey en el año de 1995 obtenida del INEGI (2011). | 66 |
| 26 | Imagen satelital de la Zona Metropolitana de Monterrey del año 1999, obtenida del sitio web de la NASA (2012). | 66 |
| 27 | Imagen satelital del año 2005 de la Zona Metropolitana de Monterrey, obtenida del programa informático Google Earth (2012). | 67 |
| 28 | Imagen satelital del año 2009 de la Zona Metropolitana de Monterrey, obtenida del programa informático Google Earth (2012). | 68 |
| 29 | Archivo con extensión .dwf, que representa la malla que discretiza a la cuenca del río la Silla, obtenido del SIG Idrisi. | 69 |

| Figura | Descripción | Página |
|---------------|--|---------------|
| 30 | Archivo con extensión .dwf, que representa el parteaguas o perímetro de la cuenca del río la Silla, obtenido del SIG Idrisi. | 69 |
| 31 | Cuenca del río La Silla, discretizada por una malla de 1km cuadrado por cuadro, y su valor en porcentaje de vegetación en el año 1995. | 72 |
| 32 | Cuenca del río La Silla, discretizada por una malla de 1km cuadrado por cuadro, y su valor en porcentaje de vegetación en el año 1999. | 73 |
| 33 | Cuenca del río La Silla, discretizada por una malla de 1km cuadrado por cuadro, y su valor en porcentaje de vegetación en el año 2005. | 74 |
| 34 | Cuenca del río La Silla, discretizada por una malla de 1km cuadrado por cuadro, y su valor en porcentaje de vegetación en el año 2009. | 75 |
| 35 | Incremento de la zona urbana de la cuenca del río La Silla a través del periodo analizado. | 76 |
| 36 | Escenarios de vegetación, y su relación con el volumen anual del año 1995. | 80 |
| 37 | Escenarios de vegetación, y su relación con el caudal pico del año 1995. | 80 |
| 38 | Escenarios de vegetación, y su relación con el volumen anual del año 1999. | 81 |
| 39 | Escenarios de vegetación, y su relación con el caudal pico del año 1999. | 81 |
| 40 | Escenarios de vegetación, y su relación con el volumen anual del año 2005. | 82 |
| 41 | Escenarios de vegetación, y su relación con el caudal pico del año 2005. | 82 |
| 42 | Escenarios de vegetación, y su relación con el volumen anual del año 2009. | 83 |
| 43 | Escenarios de vegetación, y su relación con el caudal pico del año 2009. | 83 |
| 44 | Comparativa de los escenarios de vegetación y los volúmenes de escurrimiento, bajo diferentes periodos de simulación. | 84 |
| 45 | Comparativa de los escenarios de vegetación y los caudales pico, bajo diferentes periodos de simulación. | 84 |
| 46 | Proyección de porcentaje de urbanización para el año 2020. | 85 |

| Figura | Descripción | Página |
|---------------|--|---------------|
| 47 | Cuenca del río La Silla, discretizada por una malla de 1km cuadrado por cuadro, y su valor en porcentaje de vegetación estimado para el año 2020. | 86 |
| 48 | Carta editada por CONANP e INEGI a escala 1:150,000 (metros) y el trazo (línea azul) de la delimitación del Parque Nacional Cumbres de Monterrey dentro de la zona en estudio. | 88 |
| 49 | Polilínea georreferenciada (línea amarilla) exportada de AutoCAD Civil 3D 2010 a Google Earth, la cual indica los límites del Parque Nacional Cumbres de Monterrey, dentro de la cuenca del río La Silla (línea roja). | 89 |
| 50 | Cuenca del río La Silla, discretizada por una malla de 1km cuadrado por cuadro, y su valor en porcentaje de vegetación, de acuerdo al límite del Parque Nacional Cumbres de Monterrey (línea amarilla). | 90 |
| 51 | Comparativa de los escenarios de vegetación y los volúmenes de escurrimiento, bajo diferentes periodos de simulación. | 92 |
| 52 | Comparativa de los escenarios de vegetación y el caudal pico, bajo diferentes periodos de simulación. | 92 |

Lista de tablas

| Tabla | Descripción | Página |
|--------------|---|---------------|
| 1 | Parámetros del modelo CEQUEau | 22 |
| 2 | Parámetros fisiográficos de la cuenca del río La Silla | 41 |
| 3 | Valores obtenidos de forma automatizada de los parámetros fisiográficos de la cuenca del río La Silla. | 61 |
| 4 | Porcentajes de vegetación de cada cuadro que discretiza a la cuenca | 71 |
| 5 | Resultados de simulación en base a la vegetación del año 1995. | 77 |
| 6 | Resultados de simulación en base a la vegetación del año 1999. | 77 |
| 7 | Resultados de simulación en base a la vegetación del año 2005. | 77 |
| 8 | Resultados de simulación en base a la vegetación del año 2009. | 78 |
| 9 | Años de simulación y sus diferentes escenarios de cobertura vegetal. | 79 |
| 10 | Resultados obtenidos de distintos periodos de simulación con el escenario de vegetación 2020. | 87 |
| 11 | Resultados obtenidos de distintos periodos de simulación con el escenario de vegetación del Parque Nacional Cumbres de Monterrey. | 91 |

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1 Antecedentes | 4 |
| 1.2 Justificación | 12 |
| 1.3 Hipótesis | 14 |
| 1.4 Objetivos | 15 |
| 1.4.1 Objetivo general | 15 |
| 1.4.2 Objetivo particular | 15 |
| | |
| 2. Marco teórico | 16 |
| 2.1 El modelo hidrológico distribuido CEQUeau | 16 |
| 2.1.1 La función de producción y transferencia | 17 |
| 2.1.2 Archivos requeridos en la modelación hidrológica | 19 |
| 2.1.3 Calibración y validación del modelo CEQUeau | 23 |
| 2.1.4 Evaluación de resultados | 23 |
| 2.2 Sistemas de Información Geográfica (SIG) | 26 |
| 2.2.1 Sistemas de Información Geográfica e hidrología | 28 |
| 2.2.2 El SIG Idrisi | 29 |
| 2.2.2 Modelo Digital de Elevación (MDE) | 30 |
| | |
| 3. Metodología | 35 |
| 3.1 Zona de estudio | 35 |
| 3.1.1 Ubicación | 35 |
| 3.1.2 Hidrografía | 37 |

| | |
|---|-----|
| 3.1.3 Clima | 38 |
| 3.1.4 Tipo de vegetación | 39 |
| 3.1.5 Características fisiográficas | 40 |
| 3.1.6 Estratigrafía | 41 |
| 3.2 Modelación hidrológica CEQUeau | 42 |
| 3.2.1 Módulo hidrogeomático Idrisi-CEQUeau | 43 |
| 3.2.2 Obtención de la base de geodatos requerida por el módulo Idrisi-CEQUeau | 44 |
| 3.2.3 Aplicación del módulo CEQUeau. | 49 |
| 3.2.4 Calibración y validación del modelo hidrológico CEQUeau | 50 |
| 3.2.5 Obtención de los porcentajes de vegetación | 51 |
| 3.2.6 Simulación de escenarios | 54 |
| | |
| 4. Resultados y discusión | 61 |
| 4.1 Parámetros fisiográficos | 61 |
| 4.2 Módulo hidrogeomático | 62 |
| 4.3 Calibración y validación | 64 |
| 4.4 Porcentajes de vegetación en la cuenca del río La Silla | 65 |
| 4.5 Simulación de cobertura de vegetación en el modelo hidrológico CEQUeau | 76 |
| 4.6 Simulación de cobertura de vegetación en escenarios futuros | 85 |
| 4.6.1 Año 2020 | 85 |
| 4.6.2 Límites del Parque Nacional Cumbres de Monterrey | 88 |
| | |
| 5. Conclusiones y recomendaciones. | 95 |
| | |
| 6. Referencias Bibliográficas | 99 |
| | |
| 7. Anexos | 105 |

1. Introducción

Cada año en México durante la temporada de lluvias de verano se ve afectado por la presencia de ciclones tropicales y ondas del este, y en la temporada invernal por frentes fríos, los cuales provocan tormentas de tipo convectivo y orográfico que generan lluvias cuya magnitud afecta a la población, dañando la infraestructura doméstica, urbana y agropecuaria, entre otros (Cervantes–Sánchez, 2010).

Todo suceso que se aleja del promedio, es menos probable que ocurra por definición, pero en ocasiones este término puede ser sustituido por suceso “extremo” y supone la superación de un umbral (Schumm, 1980). De igual manera, los eventos meteorológicos extremos son episodios lluviosos de gran intensidad, los cuales son capaces de provocar como consecuencia, importantes pérdidas humanas y de infraestructura de la zona afectada. Debido a lo anterior, es importante el estudio de estos episodios lluviosos, pues en ellos se activan los procesos de erosión superficial, cambios en los cauces, etc. (Beguiría y Lorente, 1999).

Así mismo, la fuerte precipitación causa dos tipos de problemas. El primero es debido a la infiltración del agua en la cimentación de los edificios causando daños estructurales; si

la lluvia es persistente, simplemente la estructura se puede colapsar por su propio peso. El segundo problema más fuerte y común, es la inundación sobre el suelo ya que significa un alto riesgo en zona de valles junto con sus estructuras e instalaciones críticas de transporte, tales como carreteras y puentes.

El Estado de Nuevo León, a pesar de que no cuenta con litorales, se ha visto afectado por eventos meteorológicos extremos, como por ejemplo: el huracán Beulah en septiembre de 1967, Gilberto en septiembre de 1988, Emily en julio del 2005 y Alex en junio del 2010. Debido a las condiciones topográficas que existen en el área Metropolitana de Monterrey permiten que se convierta en una zona de alto riesgo, ya que es susceptible de ser afectado por inundaciones tanto pluviales como fluviales, además de provocar con la lluvia gran cantidad de accidentes viales. (Protección Civil N. L., 2010)

Por otro lado, el cambio y uso de suelo se ha constituido como uno de los factores plenamente implicados en el cambio global, alterando procesos y ciclos, lo cual se vuelve trascendental si se considera que es a través de estos cambios donde se materializa la relación hombre y el medio ambiente. Además, los ecosistemas terrestres han sufrido grandes transformaciones, debido a la conversión de la cobertura del terreno, así como a la degradación e intensificación del uso del suelo (Lambin y otros, 1999). Cuando el suelo se encuentra bajo un constante proceso de crecimiento urbano, por ejemplo la cuenca del río La Silla en la ciudad de Monterrey, México, la velocidad y el volumen del escurrimiento aumenta, arrasando gran cantidad de material hacia las partes bajas de la misma, ocasionando una respuesta más agresiva e inmediata ante las lluvias, ya que el

tiempo de retención de agua disminuye y el caudal pico se incrementa (Rubio–Vega, 2009).

En los últimos años se ha desarrollado en hidrología una técnica conocida como modelación hidrológica, la cual trata de reproducir mediante un modelo principalmente matemático, el comportamiento de los procesos hidrológicos en un área determinada. La modelación hidrológica abarca diversos campos, tales como: control de calidad del agua, sistema de alarma contra inundaciones, transporte y depósito de sedimentos, erosión de suelos, etc. Además, los modelos hidrológicos se convierten en datos de entrada para la modelación hidráulica, como los que se utilizan en la rectificación y rehabilitación de cauces (Argüello, 1992).

En esta investigación, se utilizará el modelo hidrológico CEQUeau, con el fin de evaluar el escurrimiento asociado a eventos extremos de precipitación en la cuenca urbana del río La Silla, generado por el cambio y uso del suelo.

1.1 Antecedentes.

En los últimos años, las cuencas urbanas de México como en otras partes del mundo, han estado caracterizadas por un aumento en la impermeabilización y reducción de la infiltración debido al cambio de uso del suelo, como consecuencia de la construcción de edificios, pavimentación de vialidades y otros, los cuales producen un impacto sobre las condiciones de escurrimiento.

Muchos autores han tratado de estudiar, analizar y cuantificar este fenómeno lluvia-escurrimiento, asociado a cambios de uso del suelo utilizando diferentes metodologías. Por ejemplo, Berlanga-Robles y otros (2011), integraron un Sistema de Información Geográfica (SIG) con mapas temáticos de cobertura y usos del suelo, cartas edafológicas y registros históricos de precipitación, para analizar las tendencias de cambio de los usos del suelo y su impacto sobre los patrones de escurrimiento en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa. Se generaron mapas temáticos de coberturas y usos de suelo de la cuenca a partir de la clasificación supervisada de imágenes de satélite LANDSAT, con niveles de exactitud mayores de 85% para los años 1973, 1986 y 2000. Utilizaron el modelo del número de curva, el cual fue desarrollado por el Servicio de Conservación del Suelo del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (SCS-USDA, por sus siglas en inglés), para evaluar el impacto que los cambios de cobertura y uso del suelo han tenido sobre el potencial y volumen de escurrimientos en la cuenca. En todos los años analizados la agricultura fue el uso de suelo predominante, cubriendo entre el 34% y 45% del área de la cuenca. El volumen de escurrimiento medio anual se estimó en $198 \times 10^6 \text{ m}^3$ para 1973, $302 \times 10^6 \text{ m}^3$ para 1986 y $197 \times 10^6 \text{ m}^3$ para el 2000, que correspondieron a coeficientes de escurrimiento del 16%, 20% y 23% respectivamente.

Finalmente concluyeron que en la cuenca predominan los suelos de textura fina con poca capacidad de infiltración, por lo que los cambios de cobertura y uso de suelo no se reflejaron en la misma magnitud en el potencial de escurrimiento de la cuenca. Los coeficientes de escurrimiento se mantuvieron relativamente constantes y las variaciones en el volumen de escurrimiento medio anual se deben más a las variaciones en la precipitación que a los cambios de uso de suelo.

Así mismo, Miranda-Aragón y otros (2009), investigaron la dinámica de uso del suelo en la cuenca del río Grande, en Guerrero, con el fin de confirmar un aumento en el gasto máximo a través del tiempo, debido al recurrente derrumbe del puente principal, que comunica a la localidad de Villa Madero con su cabecera municipal Tlalchapa, Guerrero, ocasionado por precipitaciones históricas no registradas. El estudio consistió en obtener inicialmente los usos del suelo mediante la técnica de clasificación supervisada en una imagen de satélite Landsat de 1973 y mediante la digitalización en monitor sobre una imagen de muy alta resolución espacial QuickBird del año 2006. El modelo hidrológico empírico del proceso lluvia-escurrimiento de la cuenca fue realizado con el sistema HEC-HMS para los escenarios 1973 y 2006. Encontraron que no hubo efectos significativos del cambio de uso del suelo en el gasto pico empírico de 100 años de periodo de retorno a la salida de la cuenca ($431 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en 1973 y $484 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en 2006), probablemente debido a que los principales cambios fueron de coberturas arboladas a pastizales que registran números de escurrimiento N similares (51.55 en 1973 y 57.87 en 2006).

Además, Henríquez y otros (2006), desarrollaron un modelo de simulación espacial del cambio de uso de suelo, el cual les permitió evaluar y simular el cambio en el coeficiente

de escurrimiento superficial para la ciudad de los Ángeles y sus alrededores, en Chile, en el periodo 1998-2002. El modelo se desarrolló en el SIG Idrisi Kilimanjaro y la evaluación del método del coeficiente de escurrimiento se basó en el método del Servicio de Conservación de Suelo de Estados Unidos. Encontraron que la ciudad de los Ángeles ha crecido en el periodo de 1998 al 2006 un 23%, disminuyendo los matorrales, cultivos, pastizales y humedales. Elaboraron curvas que relacionan el escurrimiento superficial con la precipitación para los años 1998, 2006, 2014 y 2022, obteniendo como resultados que bajo los 20 mm de precipitación no se produce un escurrimiento superficial, excepto para la proyección del 2022 que sobrepasa los 20 mm de precipitación, donde la tendencia de la curva es creciente a medida que la lluvia incrementa su monto, hasta llegar a los 100 mm. Esto se debe a que para el 2022 se presenta una mayor extensión de la superficie urbana simulada.

También, Juárez-Méndez y otros (2010), analizaron el cambio de uso del suelo bajo los escenarios de 1990 y 2005, y su efecto en los escurrimientos de la cuenca del Río Huehuetán, localizada en la costa de Chiapas, México, utilizando en ambos casos el mismo evento de lluvia histórico del huracán Stan (octubre del 2005), y empleando el modelo HEC-HMS. El análisis del cambio de uso del suelo se llevó a cabo mediante técnicas de interpretación de imágenes de satélite LANDSAT TM para 1990 y SPOT 5 para 2005 y mediante sobreposición cartográfica en el Sistema de Información Geográfica ArcView GIS 3.2. Los resultados encontrados mostraron que el escurrimiento máximo para 1990 fue 2566.4 m^3 , y para el 2005 fue 2544 m^3 con una disminución de 0.87%, lo cual indica que no existieron diferencias significativas en ambos escenarios. De

esta manera, se concluyó que las inundaciones en la cuenca del Río Huehuetán se debieron al evento meteorológico y no al cambio de uso del suelo.

De igual manera, Hernández-Villarreal y otros (2010), analizaron de manera espacial y temporal los cambios de uso de suelo en la Cuenca del Río Atoyac en el periodo de 15 años de 1990 a 2005 a nivel de cuenca hidrográfica, usando el software Idrisi del Sistema de Información Geográfica (SIG), lo cual ha influido en la modificación de los procesos de escurrimiento de agua en la cuenca. Los resultados obtenidos demuestran que la cobertura que contribuyó a la disminución del bosque fue la agricultura, así mismo la cobertura que contribuyó a que aumentara fue la del bosque. En la zona urbana la cobertura que más contribuyó a su aumento fue la agricultura. Estos resultados son coherentes debido a que generalmente la primera cobertura presente es el bosque, posteriormente pasa a agricultura y finalmente se convierte en zona urbana, pero esto no sucede en todos los casos, pues depende de la zona y sus características propias de la región. Concluyeron que para el periodo de estudio (1990 a 2005), hubo un aumento en la extensión de superficie de la zona urbana lo cual trae consigo repercusión en la demanda de los recursos naturales de la cuenca. Así mismo, la reducción de áreas de bosque, conjuntamente con los cambios de las otras coberturas contribuye a la modificación del ciclo hidrológico de la cuenca, los cuales se manifiestan en una menor capacidad de infiltración y un mayor coeficiente de escurrimiento. Finalmente, esta generación de ésta información servirá para las instituciones, organismos o gobiernos quienes podrán considerarlo en la toma de decisiones.

Así mismo, Magaña-Rueda (2007), elaboró escenarios de cambio climático en humedales costeros del Golfo de México. Su objetivo fue proveer información sobre las amenazas asociadas a cambio climático, necesaria para identificar las medidas de adaptación para su instrumentación. Con el fin de conocer el efecto del cambio de uso del suelo se consideraron las condiciones actuales y futuras del uso de éste. La proyección del uso de suelo a 20 años muestra una reducción de las áreas con mayor densidad de vegetación como son los diferentes tipos de selva, la desaparición de los manglares y un aumento de las áreas con vegetación rala, como por ejemplo los pastizales. Este cambio es muy importante ya que una vegetación más pobre ocasiona que exista menor infiltración y aumente los escurrimientos.

Por otro lado, el método del Número de Curva (CN) fue desarrollado en 1954 en Estados Unidos, y es uno de los más utilizados para la estimación de los volúmenes de escurrimiento, ya que toma en cuenta, con un solo parámetro, las principales características de la cuenca (pendiente y el uso y tipo de suelo) que producen el escurrimiento. Además, este método tiene la ventaja de ser conceptual y muy fácil de aplicar, debido a que estima el escurrimiento directo a partir de la precipitación.

De esta manera, se empleó la distribución espacial de los grupos hidrológicos de suelo y de su vegetación para estimar los mapas de Número de Curva (CN), y éstos a su vez, en la generación del escurrimiento de la zona. Si se tienen mayores escurrimientos con lluvias intensas debido al aumento del CN de los suelos significa que las infiltraciones se reducen y que en temporadas de secas los acuíferos no serían capaces de mantener la humedad suficiente dentro de estos humedales. En efecto, el aumento de los CN significa

un aumento en el tipo de vegetación que no es capaz de retener el tiempo suficiente el flujo del agua para su infiltración y que es más vulnerable a la erosión generando transporte de sedimentos que se van a depositar en la parte baja de la cuenca. La existencia de los humedales depende de un frágil equilibrio que mantenga el adecuado balance hídrico entre las diversas etapas del ciclo hidrológico en la fase terrestre y el cambio de uso del suelo es la variable que más afecta este balance. Concluyó que la mayoría de los impactos que podría tener un uso de suelo como el proyectado en esta investigación, están en el balance hídrico regional. Las alteraciones en el uso de suelo, principalmente por pérdida de bosques, resultarán en mayores escurrimientos a costa de las infiltraciones. Esta situación alterará el ciclo hidrológico regional y consecuentemente la salud de los humedales costeros del Golfo de México. Por ello, es necesario que las medidas de adaptación consideren fundamentalmente un reordenamiento territorial y ecológico en toda la zona de estudio.

Por otra parte, Oñate-Valdivieso (2006), analizó la influencia del incremento del área urbanizada con los eventos extremos de precipitación en la cuenca del río Zamora, en Loja, Ecuador. El análisis del incremento urbano se realizó a partir de la fotointerpretación de fotografías aéreas correspondientes a los años 1976, 1984, 1998 y 2002. Se recopiló información histórica de tipo y uso de suelo de la zona en estudio. Con base en la cartografía existente, se elaboró un Modelo Digital del Terreno (DTM) aplicando ArcView 3.2, para luego, aplicando el preprocesador hidrológico GEO-HMS del US Army Corps of Engineers (USACE), crear un modelo geomorfológico de la cuenca subdividida en siete microcuencas. La generación de caudales se realizó mediante el modelo HEC-HMS del USACE. En varios lugares de interés se realizó el

levantamiento topográfico a detalle a fin de modelar, utilizando el modelo HEC-RAS del USACE, el comportamiento que tendrían obras de conducción y protección, así como los cauces naturales, ante los caudales extremos, resultado de la interacción de las diversas tormentas de diseño y las condiciones futuras de urbanización. Se obtuvo que para el periodo considerado el área urbana en la zona de estudio ha experimentado un aumento del orden de 216%, pero a pesar de esto, solo cubre el 9.6% del total de la cuenca en estudio. Se evidencia un mayor incremento de caudales, para un mismo periodo de retorno, en las microcuencas en las que el crecimiento urbano ha sido mucho más significativo. Por tal motivo, el autor concluyó: “las cuencas que experimentan mayor crecimiento de área urbana son las que presentan un mayor incremento en sus caudales de crecida, observándose una relación de tipo lineal”

Finalmente, Ruberto y otros (2006), determinaron la variabilidad del escurrimiento superficial y su impacto hidrológico cuando existen modificaciones en las superficies impermeables en la cuenca Cisterna, ubicada en la ciudad de Resistencia, en Argentina. El análisis se llevó a cabo en dos escenarios: 1995 y 2006. Para la condición de 1995, se contaba con planos de la cuenca, fotografías aéreas. Para el 2006, se tenían a disposición imágenes satelitales LANDSAT y visitas de campo. Se dispuso la clasificación de los diferentes usos del suelo en el año 1995 según (SUPCE-AFIN, 1995) producto de la clasificación supervisada, las cuales fueron respetadas y evaluadas de igual manera para el escenario del año 2006. Como ya se contaba con la simulación hidrológica del año 1995, se procedió a calibrar el modelo ArHymo (desarrollado en 1993 por el Instituto Nacional de Ciencias y Técnicas Hídricas, INCYTH - Centro Regional Andino), con el cual se calcularon los hidrogramas de escurrimiento directo. Según la simulación

correspondiente al año 1995, el hidrograma de escurrimiento directo presenta un caudal pico de $1.79 \text{ m}^3/\text{s}$ y un volumen de escurrimiento de 15000 m^3 . Sin embargo, para el año 2006, el caudal pico llegó a $2.12 \text{ m}^3/\text{s}$ y el volumen de escurrimiento alcanzó los 19000 m^3 . Por lo tanto, existió un incremento del 15.57 % en el caudal pico, y 21.05% en el volumen de escurrimiento, debido al aumento del 24.12% en las áreas impermeables. Concluyeron que el aumento de la impermeabilización, asociada al proceso de urbanización, mostró una relación muy directa con el aumento del caudal pico dejando evidencia que no hay amortiguamiento.

1.2 Justificación.

El agua como componente básico del ciclo hidrológico, es uno de los recursos más importantes para la conservación de la vida en el planeta. En los últimos años tanto en México como en otras ciudades del mundo, han experimentado un proceso constante de cambio de uso del suelo debido al crecimiento urbano, el cual ocasiona un impacto negativo que se manifiesta en un incremento en la pérdida de suelo y por lo tanto, el aumento de los escurrimientos. (Juárez-Méndez y otros, 2009).

Así mismo, las lluvias que acompañan a los huracanes son extremadamente variables y difíciles de predecir, por lo que éstas precipitaciones atípicas o extraordinarias ocasionan grandes pérdidas de infraestructura en zonas urbanas, como por ejemplo los daños estructurales causados por la infiltración del agua en los edificios, así como las inundaciones que pone en riesgo todos los valles junto con sus estructuras e instalaciones críticas de transporte, tales como carreteras y puentes.

Debido a esto, es necesario el uso y aplicación de tecnologías que nos permitan evaluar el impacto de los escurrimientos ocasionados por eventos de precipitación extremos en una cuenca urbana. En este sentido, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en conjunto con la modelación hidrológica distribuida son herramientas útiles que nos permitirán, además de modelar los cambios de cobertura y usos del suelo, estudiar el impacto que estos cambios tienen sobre los procesos hidrológicos dentro de la cuenca en estudio.

Finalmente, se tendrá a disposición información confiable que facilite la toma de decisiones para el manejo integral de la cuenca, así como la protección de centros de población en zonas bajas que se pueden ver afectados con el aumento del volumen de agua del cauce principal.

1.3 Hipótesis.

Si se aplican técnicas de modelación hidrológica y Sistemas de Información Geográfica a la cuenca del Río La Silla, entonces se podrá evaluar el impacto del escurrimiento asociado a eventos extremos, generado por el cambio y uso del suelo.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo general.

Evaluar el impacto del escurrimiento asociado a eventos de precipitación extremos en la cuenca del Río La Silla, y su relación con el cambio y uso de suelo.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Obtener la información georreferenciada de las estaciones hidrometeorológicas de la zona de estudio.
- Obtener el parteaguas de la cuenca, así como la red hidrográfica y los principales parámetros hidrográficos, a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE).
- Analizar la información cartográfica, ocupación de suelo e hidrometeorológica disponible, para organizar y generar la base de datos en las cuencas en estudio.
- Preparar, calibrar y validar el modelo hidrológico utilizando los datos hidrometeorológicos históricos disponibles.
- Obtener y analizar información de ocupación de suelo (imágenes satelitales históricas) de la cuenca en estudio, para poder realizar escenarios reales de cobertura vegetal dentro del modelo hidrológico CEQUeau.
- Proyectar escenarios futuros de urbanización dentro de la cuenca del río La Silla.
- Comparar los resultados obtenidos y asociarlos con el cambio y uso del suelo que ha ocurrido dentro de la zona en estudio.

2. Marco teórico

2.1 El modelo hidrológico distribuido CEQUeau.

El modelo hidrológico CEQUeau fue desarrollado en el Instituto Nacional de la Investigación Científica-Agua (INRS-EAU) de la Universidad de Quebec, en Canadá, el cual es capaz de reproducir el ciclo hidrológico en una cuenca (Morin y Paquet, 1995).

CEQUeau es un modelo hidrológico de parámetros distribuidos que puede discretizar o dividir el área de la cuenca en 1000 cuadrados como máximo, los que a su vez también se pueden dividir en hasta 4 subáreas. Cada cuadrado es identificado por coordenadas I y J, mientras que cada subárea es identificada por las letras A, B, C, D. Este proceso permite al modelo calcular los caudales en cada cuadro o subcuadro, tomando en cuenta las variaciones espacio-temporales de las características fisiográficas e hidrogeomáticas de la cuenca(Figura 1).

Además, CEQUeau permite estimar caudales en puntos aforados como en puntos no aforados dentro de la cuenca, y ofrece la posibilidad de simular la existencia de almacenamientos artificiales (Magaña, 2008).

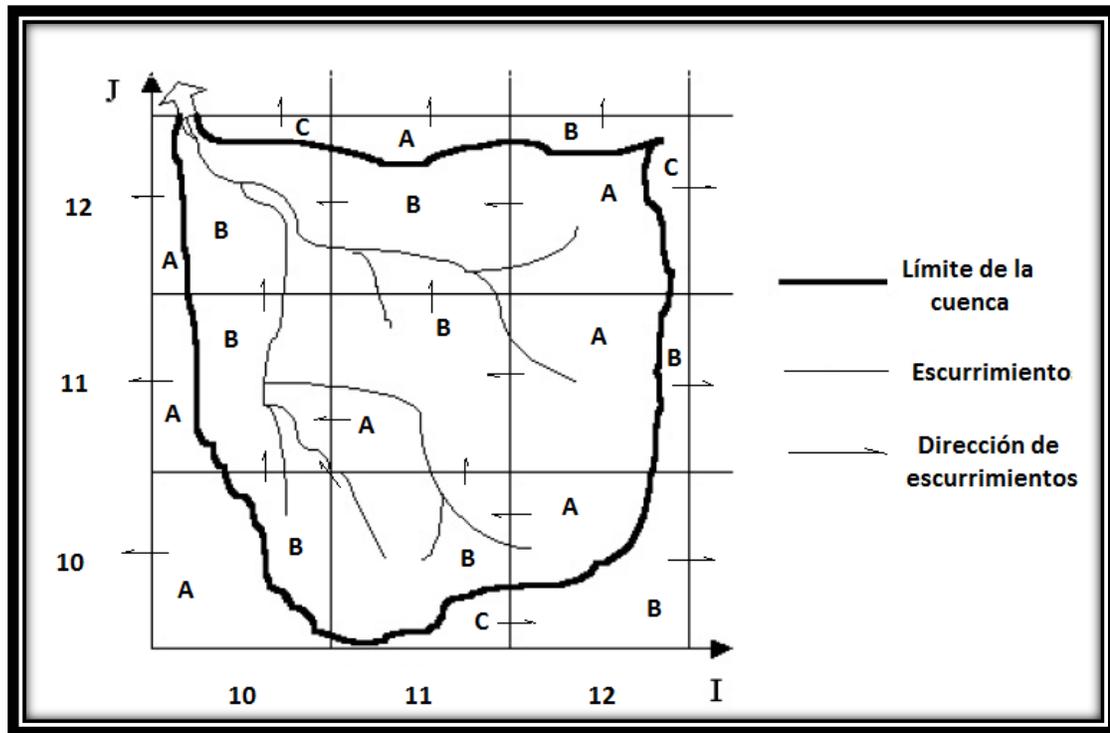


Figura 1. Discretización de la cuenca en el modelo CEQUeau.

(Adaptación de Morin y Paquet, 2005)

2.1.1. La función de producción y transferencia.

El modelo consta básicamente de dos partes que en conjunto describen el movimiento del agua dentro de la cuenca. La primera parte es la función de producción (figura 2), la cual se refiere al movimiento vertical del agua, como por ejemplo: lluvia, evapotranspiración, infiltración, etc. La segunda parte es la función de transferencia (figura 3), la cual describe el movimiento del agua en sentido horizontal, esto es, la transferencia del flujo en la red de drenaje y tiene en cuenta la influencia de lagos y ciénegas, así como presas y derivaciones, entre otras.

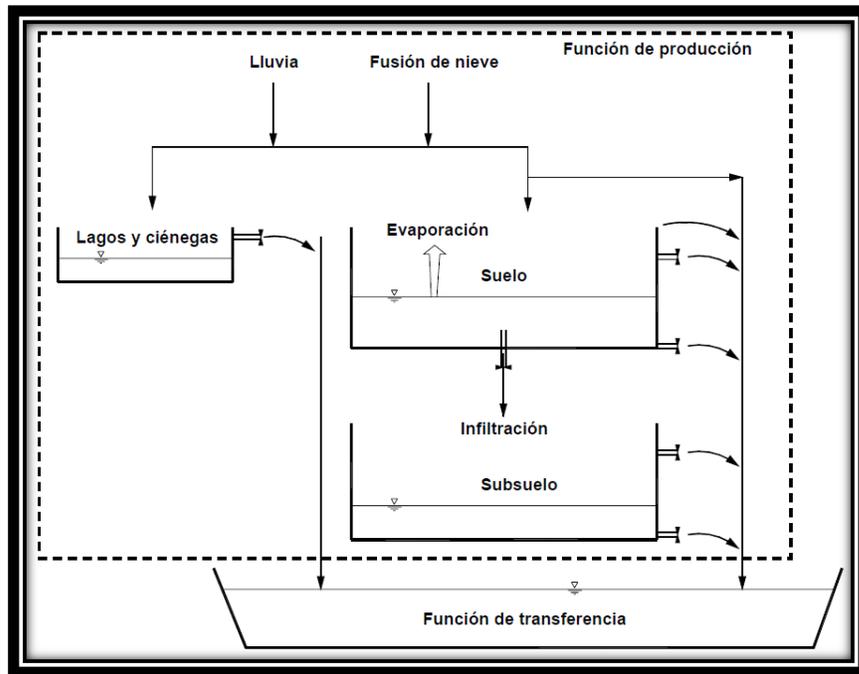


Figura 2. Función de producción del modelo CEQUeau (Adaptación de Morin y Paquet, 1995)

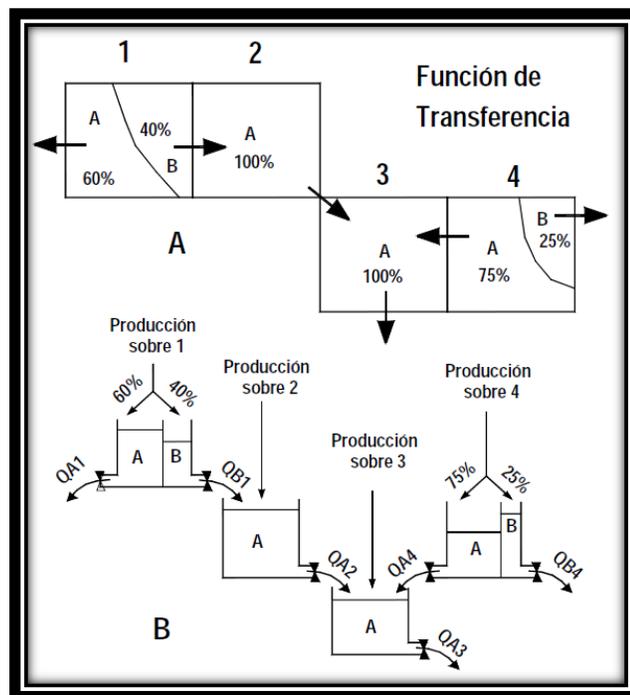


Figura 3. Función de transferencia del modelo CEQUeau (Adaptación de Morin y Paquet, 1995)

Por otra parte, el modelo CEQUeau calcula la evapotranspiración a partir de la fórmula de Thornthwaite modificada (Morin y Paquet, 1995), la cual considera la duración potencial de la radiación solar en función de la latitud y del día del año, así como del agua disponible en la capa superficial de la tierra, calculándose con la siguiente ecuación:

$$ETHORN_D = \left(\frac{10}{30.4} \right) * 1.62 \left(\frac{10 * TJE}{XIT} \right)^{XAA}$$

Donde:

$ETHORN_D$ = Evapotranspiración diaria (mm).

TJE = Temperatura media del paso del tiempo sobre el cuadro entero considerado (°C)

XAA = Exponente de la fórmula de Thorthwaite.

XIT = Valor del índice de Thorthwaite.

30.4 = Número de días por mes.

2.1.2. Archivos requeridos en la modelación hidrológica.

El modelo CEQUeau requiere de diferentes datos de entrada para evaluar los caudales generados en cada cuadro parcial, los cuales son:

- Datos fisiográficos.
- Datos de la cuenca.
- Datos hidrometeorológicos.

El archivo de datos fisiográficos, el cual tiene una extensión “.PHY”, está formado por un conjunto de datos que son tomados de la información topográfica y que tratan de representar la física del fenómeno de escurrimiento del agua en la cuenca hasta el punto

de análisis o salida de la misma. Para lograr esto, el modelo subdivide algunos de los elementos cuadrados en elementos parciales, teniendo en cuenta los parteaguas internos. Esta subdivisión permite tomar la importancia de la topografía sobre la dirección del escurrimiento.

Los datos fisiográficos que son determinados por cada cuadrado son:

- Porcentajes de bosques.
- Porcentaje de lagos.
- Elevación de la esquina inferior izquierda.

Los datos requeridos para cada subárea son:

- La dirección del flujo del agua.
- Su porcentaje de área relativo con respecto al cuadrado.

Por otro lado, el archivo de datos de la cuenca (cuya extensión es .BV) contiene las claves de las estaciones, la ubicación en cuadros CEQUeau de cada estación real o ficticia, el número de estaciones, así como el área de la cuenca en km².

El archivo de datos hidrometeorológicos (precipitación, temperaturas máximas y mínimas), con extensión .DHM, se obtiene de las estaciones meteorológicas seleccionadas y son los datos de entrada para el programa; los datos de las estaciones hidrométricas son utilizados solamente para calibración de los parámetros y la verificación de la exactitud de los caudales simulados por el modelo.

Finalmente, el archivo de parámetros del modelo (.PAH), contiene propiamente los parámetros del modelo CEQUeau, las estaciones meteorológicas que están consideradas, así como el periodo de simulación.

Los parámetros del modelo (tabla 1), los cuales algunos se determinan según la física del fenómeno, otros están en función de las características hidrológicas y fisiográficas de la cuenca, y los demás se definen a través del proceso de calibración, son los siguientes:

- Los parámetros de los recipientes, como por ejemplo el suelo, los acuíferos y ciénegas.
- Los parámetros que gobiernan la fusión de la nieve.
- Los parámetros que gobiernan la evapotranspiración.
- Los parámetros de transferencia.
- Diversos parámetros y constantes.

Tabla 1. Parámetros del modelo CEQUeau.

| Parámetros del recipiente suelo-acuífero-ciénegas | | |
|--|-----|---|
| CIN´ | * | Coeficiente de infiltración del recipiente suelo hacia el acuífero. |
| CVMAR´ | * | Coeficiente de vaciado del recipiente lagos y ciénegas. |
| CVNB´ | * | Coeficiente de vaciado del recipiente acuífero (orificio de fondo). |
| CVNH´ | * | Coeficiente de vaciado del recipiente acuífero (orificio superior). |
| CVSB | * | Coeficiente de vaciado del recipiente suelo (orificio de fondo). |
| CVSI´ | * | Coeficiente de vaciado del recipiente suelo (orificio intermedio). |
| HINF´ | * | Altura del umbral de infiltración hacia el recipiente acuífero |
| HINT´ | * | Altura del umbral de vaciado intermedio del recipiente suelo |
| HMAR´ | * | Altura del umbral de vaciado del recipiente lagos y ciénegas. |
| HNAP´ | * | Altura del umbral de vaciado superior del recipiente acuífero |
| HRIMP´ | * | Lámina para que inicie el escurrimiento sobre superficies impermeables. |
| HSOL´ | * | Altura del recipiente suelo. |
| Parámetros que gobiernan la fusión de la nieve | | |
| STRNE | ** | Umbral de transformación lluvia-nieve. |
| TFC | ** | Tasa de fusión en bosque. |
| TFD | ** | Tasa de fusión en terreno desnudo. |
| TSC | ** | Umbral de temperatura de fusión en bosque. |
| TSD | ** | Umbral de temperatura de fusión de terreno desnudo. |
| TTD | ** | Coeficiente de déficit calorífico de la nieve. |
| TTS | ** | Umbral de madurez del depósito de nieve. |
| Parámetros que gobiernan la evapotranspiración | | |
| EVNAP | * | Fracción de evapotranspiración en el recipiente acuífero. |
| HPOT´ | * | Altura del umbral de extracción (por ETP) del agua a tasa potencial. |
| XAA | ** | Exponente de la formula de Thornthwaite. |
| XIT | ** | Índice térmico de Thornthwaite. |
| Parámetros y constantes de transferencia | | |
| EXXKT | * | Parámetro de ajuste del coeficiente de transferencia. |
| ZN | *** | Tiempo de concentración de la cuenca. |
| Parámetros y constantes diversas | | |
| COET | ** | Coef.de corrección de las temperaturas con respecto a la altitud. |
| COEP | ** | Coef.de corrección de las precipitaciones con respecto a la altitud. |
| FACT | * | Factor de modif.de las precipitaciones medias de los cuadros enteros. |
| JOEVA | * | Variables que desplazan la fecha de insolación potencial máxima respectivamente para la evapotranspiración y para la nieve. |
| JONEI | * | |
| XINFMA | ** | Infiltración máxima por día. |
| XLA | *** | Latitud media de la cuenca. |
| TRI´ | *** | Fracción de superficie impermeable. |

* = Parámetro determinado por calibración.

** = Parámetro determinado según la física del fenómeno.

*** = Constante determinada por las características fisiográficas.

´ = El valor de este parámetro puede ser variable en el espacio.

2.1.3. Calibración y validación del modelo CEQUeau.

El modelo hidrológico CEQUeau emplea un número elevado parámetros que reflejan los procesos que intervienen en el ciclo hidrológico, permitiendo la simulación de regímenes muy diferentes. Por lo tanto, la etapa de calibración es una parte esencial en la modelación hidrológica, ya que se pretende ajustar estos parámetros del modelo, con el fin de que los hidrogramas obtenidos en la simulación reproduzcan fielmente los hidrogramas registrados en la cuenca. La calibración se puede realizar mediante la técnica de prueba y error, o de una forma automatizada utilizando la herramienta de optimización de parámetros (BOTM).

Es posible a menudo encontrar una aproximación aceptable entre los caudales registrados y simulados, pero esto no significa que los valores de los parámetros sean los correctos. Para evaluar la calibración del modelo en simulaciones subsecuentes, el conjunto de parámetros deben ser probados o validados contra datos diferentes al proceso de calibración. Ésta etapa se conoce como validación del modelo.

2.1.4. Evaluación de resultados.

Existen dos criterios para la evaluación de los resultados obtenidos en la simulación hidrológica dentro del modelo CEQUeau, los cuales son los criterios numéricos y los criterios gráficos. El criterio numérico utilizado por el modelo CEQUeau es el coeficiente de Nash (1970), el cual es un parámetro que relaciona los caudales registrados con los caudales simulados (si Nash es igual a la unidad, es una simulación perfecta), y cuyo valor puede variar desde $-\infty$ hasta 1 (Morin y Paquet, 1995). Sin embargo, este criterio de evaluación solo permite obtener un índice global en la precisión de las simulaciones del

modelo, por lo que no indica que parte del ciclo hidrológico ha sido simulada correctamente.

$$NTD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2}$$

Donde:

NTD = Coeficiente de Nash, adimensional.

Q_{ci} = Caudales calculados en el día i , en m^3/s .

Q_c = Promedio de los caudales calculados en los n días.

Q_{oi} = Caudales observados en el día i , en m^3/s .

Q_o = Promedio de los caudales observados en los n días.

Por otro lado, los criterios gráficos que están disponibles, permiten analizar las simulaciones para determinar su precisión, además de que facilitan de una manera gráfica el desfase que existe entre los caudales registrados y simulados. En la figura 4, se muestran los resultados gráficos que arroja el modelo hidrológico CEQUeau.

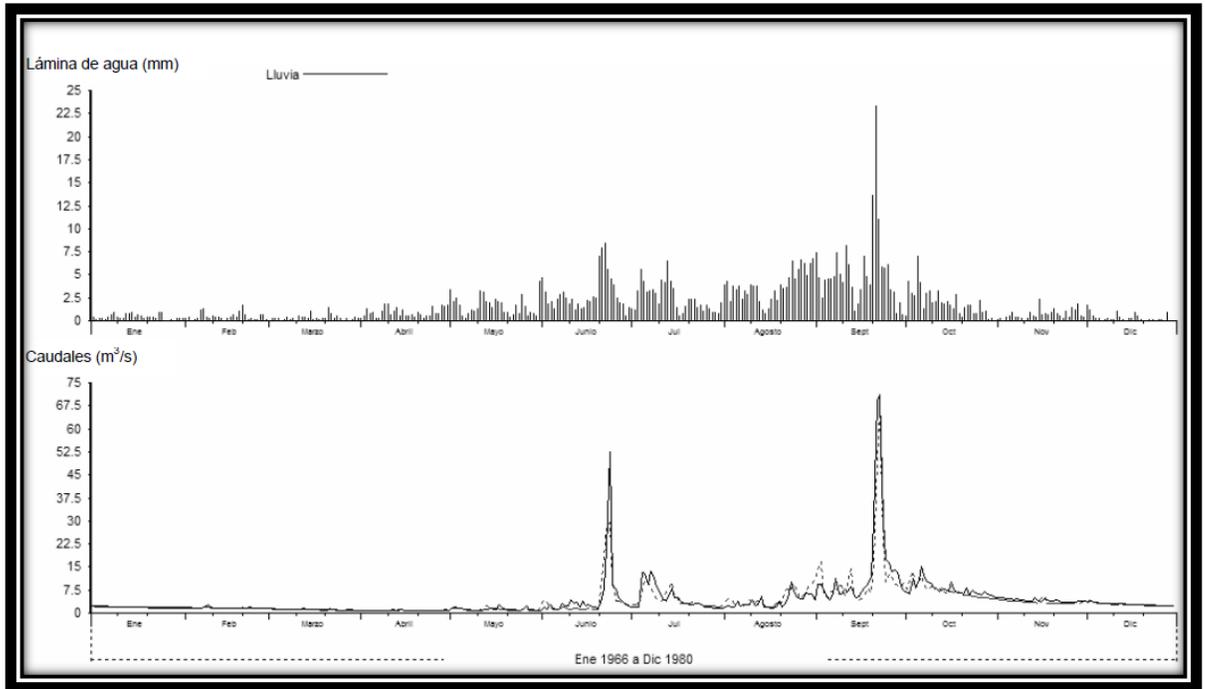


Figura 4. Resultados gráficos del modelo CEQUeau.

2.2. Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En la década de los sesenta, con el desarrollo de la tecnología informática, aparecieron una serie de programas informáticos cuya finalidad era gestionar datos espaciales georreferenciados: los Sistemas de Información Geográfica (SIG). La importancia y popularidad de los SIG radica en que las soluciones para muchos problemas frecuentemente requieren del acceso a varios tipos de información que sólo pueden ser relacionados por su distribución espacial (Del Río, 2010).

Los SIG son sistemas que permiten la captura, ingreso, almacenamiento y análisis de datos geográficos, así como también la presentación de la información resultante. Bocco et al (1991), definen a un SIG como un conjunto de programas y equipo computacional que facilita el acoplo, manipulación y transformación de datos espaciales, como por ejemplo: mapas e imágenes de satélite, y no espaciales (atributos), los cuales provienen de varias fuentes, temporal y espacialmente diferentes.

Por otro lado, los SIG están integrados por cuatro elementos o módulos principales: el módulo de entrada de datos (selección y captura), el módulo de manejo de datos (almacenamiento, recuperación y base de datos geográficos), el módulo de análisis de datos (modelamiento, reglas de análisis y monitoreo), y el módulo de salida de información, que contiene los productos generados, intermedios o finales (Rosete y Bocco, 2003). Dentro de los modelos de datos empleados por los SIG, es posible distinguir dos estructuras principales: ráster y vectorial. La estructura ráster divide el espacio en una matriz regular de celdas o píxeles, en donde la representación de los elementos se realiza señalando la existencia o no de ellos dentro de cada celda. En

cambio, la estructura ráster delinea los contornos de los elementos representados, por medio de vectores o polilíneas. De esta forma, la representación de información geográfica corresponde a una abstracción del territorio, en donde elementos geográficos complejos se representan por objetos geométricos simples: puntos, líneas y polígonos (Lee et al, 2000)

Debido a esto, los SIG se han convertido en una herramienta altamente especializada para la gestión de información espacial, lo cual se ve reflejado en la gran difusión de estos sistemas en diferentes sectores, principalmente para resolver problemas de tipo ambiental, social y económico. La importancia de gestionar información espacialmente referenciada en formato digital radica en la disminución en el tiempo de manipulación de ésta con respecto a la utilización de soportes analógicos, lo cual sitúa a los SIG como una herramienta de gran impacto en la gestión eficiente de los recursos por parte de las instituciones que disponen y utilizan dicha información (Mena y otros, 2008).

En este contexto, las principales ventajas de un SIG en relación con otros sistemas no digitales son: la capacidad de almacenamiento de datos, el hecho que estos se almacenen y presenten en forma separada, y el que se puedan presentar múltiples niveles. Además, ofrecen una gran capacidad de manejo de información, lo que permite editarla y actualizarla de forma rápida y eficiente, proporcionan velocidad en la operación del sistema, gran capacidad para establecer una relación coherente entre datos espaciales y sus atributos, así como para manipularlos simultáneamente, y una amplia capacidad de análisis y de implementación de modelos que representen la realidad. Sin embargo, los SIG presentan algunas limitaciones en comparación con los sistemas no digitales, como

por ejemplo: un costo relativamente alto de adquisición y mantenimiento del sistema, altos costos y problemas técnicos de captura y transferencia de datos, además de una inevitable necesidad de formación de cuadros especializados para su operación, así como una falsa sensación de permanente exactitud (Rosete y Bocco, 2003).

Hoy en día, se ha incrementado la demanda por la rápida disposición de bases de datos actualizadas, obligando a investigar, adaptar y evaluar nuevos métodos y procedimientos de integración de información (C. Armenakis et al, 2003). En consecuencia, cada vez es más fácil tener acceso a elementos como Modelos Digitales de Elevación (MDE), imágenes satelitales, imágenes fotográficas aéreas digitales, imágenes líder o modelos 3D, implicando un gran flujo de datos que debe ser integrado adecuadamente para obtener el máximo de provecho (Tellez and Servigne, 1997).

2.2.1. Sistemas de Información Geográfica e hidrología.

Los investigadores en hidrología encuentran cada vez más efectiva la utilización de los SIG, debido a su capacidad de gestionar datos distribuidos y referenciados en el mundo real. De este modo, la capacidad de los SIG-técnica como potentes calculadoras del territorio, permite emplear ecuaciones que ayudan a interpretar los procesos hidrológicos a partir de bases de datos, prestando estos resultados en mapas. El problema central de la integración es la reconciliación entre la forma en la que se concibe el espacio, tiempo y aleatoriedad en los modelos hidrológicos y cómo se produce en los SIG. Ni los SIG ni los modelos hidrológicos fueron concebidos inicialmente para trabajar juntos. Por otro lado, existen dos contribuciones que justifican la utilización de los SIG en la hidrología. Una de ellas está dirigida al sentido productivo, ya que permiten manipular gran cantidad de

información, mientras que la segunda, se dirige a la capacidad y las aportaciones en la aprehensión de los modelos y los sistemas hidrológicos. De forma más concreta, las funcionalidades de los SIG que han motivado su utilización en el campo de la hidrología son la disponibilidad y gestión de datos, la elaboración de mapas, análisis de modelos y sistemas, modelación de la componente espacial, así como la estimación de parámetros (diseño y calibración), y tratamiento de la incertidumbre y calidad de los resultados (Del Río, 2010).

2.2.2. El SIG Idrisi.

El SIG Idrisi fue desarrollado por Clark Labs en 1987 y cuenta con una interfaz principal y una lista de 200 módulos programados que proveen facilidades para la entrada, visualización y análisis de datos geográficos. Incluye herramientas especiales para el monitoreo ambiental y el manejo de recursos naturales, junto con análisis de cambio y series de tiempo, apoyo a las decisiones de criterios y objetivos múltiples, análisis de incertidumbres y la caracterización de estadísticas.

Desde la introducción del SIG Idrisi en 1987, se ha transformado en uno de los Sistemas de Información Geográfica para microcomputadoras basados en una estructura tipo raster y en uno de los sistemas para el procesamiento de imágenes más difundidos en el mercado.

Así mismo, SIG Idrisi permite una composición cartográfica sobre la pantalla altamente interactiva y flexible, incluyendo la especificación de estratos múltiples de datos,

personalización y posicionamiento de los elementos de mapas como anotaciones, barras de escala, proyecciones, textos o gráficos insertados, etc., y juegos de colores y símbolos personalizados. Las composiciones de mapas de IDRISI se pueden guardar para una visualización posterior. Además se puede imprimir utilizando dispositivos compatibles con Windows y exportar en una variedad de formatos comunes de publicación por computadora (Eastman, 2003)

2.2.2. Modelo Digital de Elevación (MDE).

Desde el siglo XVII, la representación del relieve siempre ha tenido importancia relevante para conocer la información que existe acerca de los elementos en la superficie de la tierra, siendo de gran importancia para el análisis y estudios de muy diversa índole en los campos de ingeniería civil y ciencias de la tierra, como por ejemplo, el estudio de la forma del terreno y los elementos presentes en el mismo, los cuales constituyen un importante insumo para muchos usuarios como cartógrafos, geólogos, hidrólogos, ingenieros, militares y, ahora en la actualidad, para los SIG.

En febrero del 2000, la NASA (National Aeronautics and Space Administration) lanzó el transbordador espacial Endeavour en para llevar a cabo la misión Shuttle Radar Topographic Mision (SRTM), con el objetivo de obtener información topográfica de la superficie de la tierra a partir del uso del radar, lo cual generó mapas topográficos que cubren el 80% de la superficie de la tierra con un error absoluto y relativo en la altitud de menos de 16 metros en un 90% aproximadamente (Magaña, 2008).

Un Modelo Digital de Elevación (MDE), es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados.

En los MDE existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital, las cuales varían dependiendo del método que se emplea para generarlos y para el caso de los que son generados con tecnología LIDAR se obtienen modelos de alta resolución y gran exactitud. La tecnología LIDAR (acrónimo en el idioma inglés de "Light Detection and Ranging", esto es, "Detección y Medición a través de la Luz"), es la combinación de tecnología diseñadas para la obtención de coordenadas tridimensionales (X, Y, Z), de puntos del terreno mediante un telémetro láser montado en un avión. A partir de estos datos llamados "Nube de puntos LiDAR ajustada al terreno" se pueden elaborar modelos digitales de elevación de alta resolución sub-métricos, tanto del terreno como de la superficie del mismo (objetos naturales o artificiales). Comparado con los métodos tradicionales la exactitud, mejor detalle y los tiempos de respuesta en la obtención de los resultados (oportunidad) son variables a considerar al momento de elegir la tecnología LiDAR como fuente de obtención de datos de elevación. Los modelos generados mediante esta tecnología tienen una cobertura territorial disponible correspondiente a la escala cartográfica 1:10,000 y 1:20,000 y pueden tener una resolución de 1 a 15 metros, con exactitud de 15 a 90 centímetros dependiendo de las características de planeación y ejecución del vuelo para la captación de los datos (INEGI, 2012).

En este contexto, un MDE se puede almacenar en una malla de cuadros o celdas, en una red irregular de triángulos, o en curvas de nivel en formato vectorial (figura 5).

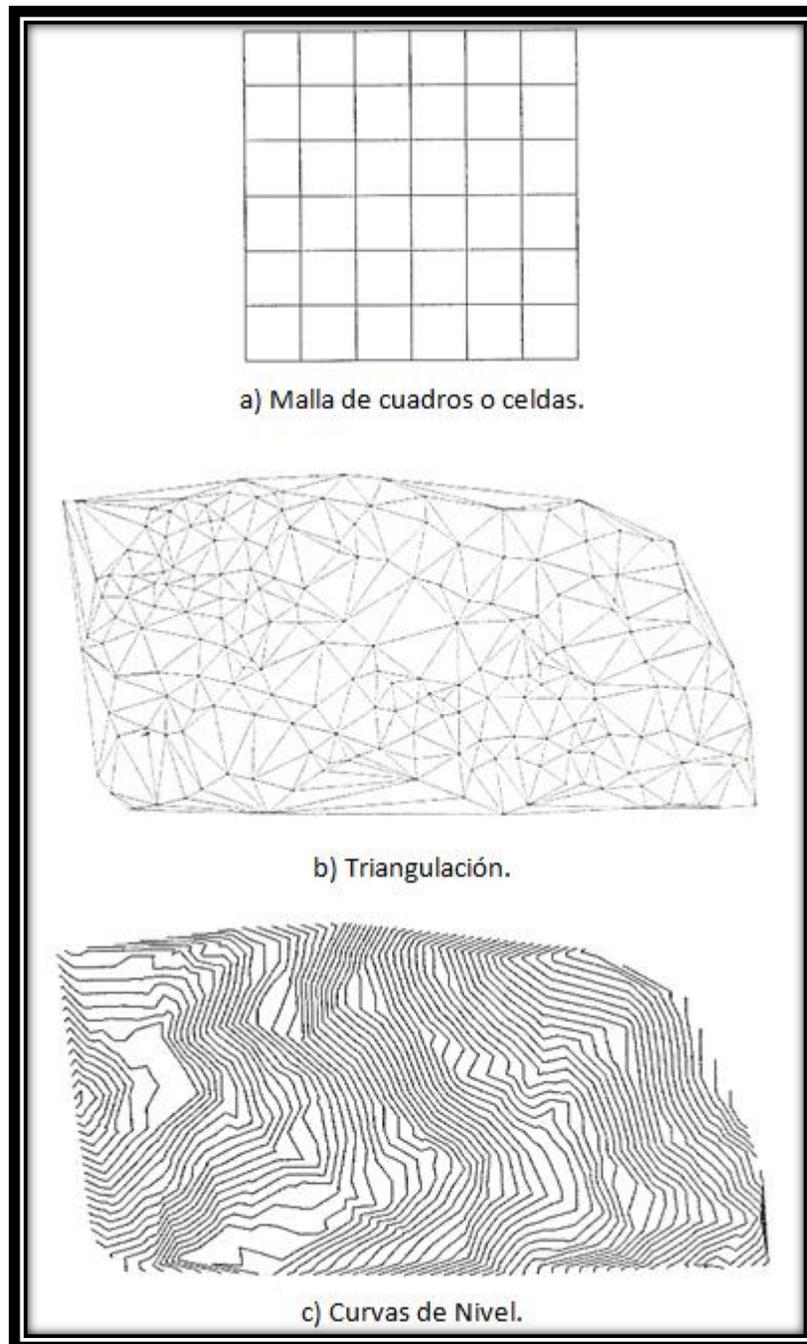


Figura 5. Tipos de estructuras de los MDE.

Los MDE basados en malla de cuadros son los más usados debido a su simplicidad, fácil procesamiento y eficiencia computacional. Los dos aspectos importantes en la selección de un MDE para la modelación hidrológica son la calidad y la resolución de los datos (Guerra-Cobián, 2007).

Los métodos para la generación de los MDE pueden dividirse en dos grupos: métodos directos e indirectos. Los métodos directos se obtienen a partir de mediciones que se realizan directamente sobre el terreno real, como por ejemplo, la toma directa de datos por medio de levantamientos topográficos con estación total o GPS, y el uso de altímetros transportados desde una plataforma aérea como el radar o láser. Por otro lado, los métodos indirectos señalan la utilización de documentos analógicos o digitales elaborados previamente para generar un MDE, como por ejemplo, la digitalización de curvas de nivel y puntos de altura de la cartografía topográfica realizada mediante procesos convencionales de conversión automática o manual, y la restitución fotogramétrica numérica, analítica y digital.

De esta manera, los MDE son ampliamente utilizados en aplicaciones relacionadas con el uso y manejo de recursos naturales, de las cuales pueden distinguirse grandes categorías de aplicaciones que utilizan los modelos. Por ejemplo, en geodesia y fotogrametría, el propósito principal es el de producir modelos de alta calidad para otras aplicaciones como ingeniería civil, y cartografía, además de emplearse en la captura de datos fotogramétricos, determinación del geoide, métodos de control de calidad, como fuente de comprobación de mediciones del terreno, edición de datos del terreno, producción de ortofotografías y cartografía topográfica. En Ingeniería Civil pueden ser utilizados en

aplicaciones tales como en el diseño para la construcción de infraestructura diversa, minas a cielo abierto, el cálculo de perfiles (secciones de perfil) y los cálculos de volúmenes (llamado también de “corte y relleno”), así como también en el diseño de carreteras, presas y otro tipo de infraestructura. Además, el manejo y planeación de los recursos naturales es el campo de mayor uso de los MDE, ya que involucra disciplinas tales como: planeación urbana y ambiental, teledetección, ciencias del suelo, agricultura, meteorología y climatología. Aplicaciones típicas serían, entre otras: estudios de impacto ambiental, prevención de desastres, localización de sitios industriales, corrección geométrica y auxiliar en la clasificación de imágenes de satélite, estudios de rentabilidad, desarrollo de estrategias de cosecha, modelos de flujo de viento y dispersión de contaminantes.

3. Metodología

3.1 Zona de estudio.

3.1.1 Ubicación.

La cuenca del Río la Silla (figura 6), se localiza dentro de la Zona Metropolitana de Monterrey, México. Es una subcuenca del Río Santa Catarina, la cual pertenece a la cuenca del Río San Juan, dentro de la Región Hidrológica 24, denominada “Río Bravo” (figura 7).

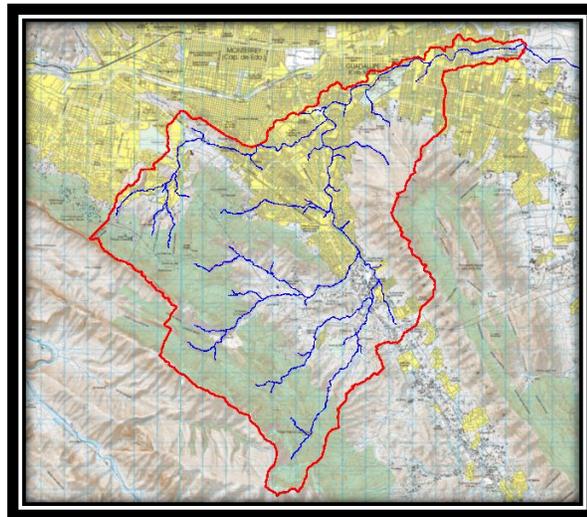


Figura 6. Cuenca del Río La Silla.

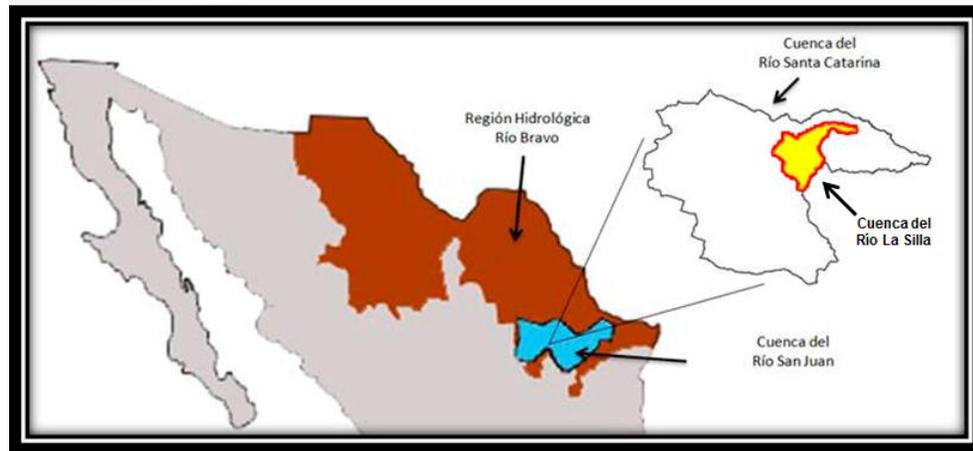


Figura 7. Región Hidrológica 24 “Río Bravo” (RH-24).

El río La Silla nace en las estribaciones de la Sierra Madre Oriental a elevaciones del orden de los 2,350 m.s.n.m., a unos 15 km al sur de la ciudad de Monterrey (figura 8).



Figura 8. Cauce del Río la Silla.

En su parte alta se le conoce con los nombres de arroyo La Estanzuela o Calabozo; desciende a través de terreno de topografía accidentada con dirección al Noreste donde pasa la comunidad de La Estanzuela, en ésta cambia su trayectoria hacia el Nor-Noreste

para recibir por la margen izquierda las aportaciones del arroyo Elizondo y aguas abajo las del arroyo Seco. A la altura del Parque La Pastora, en el municipio de Guadalupe, cambia bruscamente su curso hacia el Este-Noreste, atraviesa la carretera federal No. 40 y aguas abajo de este cruce fluye con dirección franca al Este, donde pasa por la colonia Los Lermas sitio donde se encontraba instalada la estación hidrométrica del mismo nombre; 7 km aguas abajo descarga sus aguas al río Santa Catarina por la margen derecha a la altura de la colonia Coahuila, en el municipio de Guadalupe, Nuevo León.

3.1.2 Hidrografía.

La Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM) se caracteriza principalmente por una red de corrientes intermitentes, constituida por los arroyos: Topo Chico, Las Tinajas, Elizondo y El Sabinal, entre otros, y sólo se puede considerar algunos tramos de los ríos Pesquería, Santa Catarina y La Silla de carácter permanente. En la época de lluvias, regularmente durante los meses de septiembre y octubre (temporada de ciclones y huracanes), esta red toma vida llevando en los cauces de sus arroyos y ríos un considerable volumen de agua que alimenta a las presas del este del estado, como la presa "Solidaridad" (El Cuchillo) y la presa Cerro Prieto localizadas fuera de la ZMM, y en tierras más bajas de los municipios de China y Linares Nuevo León, respectivamente. Estas presas junto con la presa Rodrigo Gómez (La Boca), revierten la condición natural de flujo hidráulico por medio del bombeo y acueductos que suministran agua a la ZMM. La red hidrográfica principal de la cuenca del río La Silla está formada por los arroyos: Elizondo, El Calabozo, La Virgen y el arroyo Seco.

3.1.3 Clima.

El clima en Nuevo León es extremo. Es principalmente caluroso y seco, pero tiene temperaturas templadas en las áreas más altas, heladas en invierno y una fuerte temporada de lluvias a veces acompañada de huracanes (figura 9). Monterrey tiene una temperatura promedio de 23°C, aunque suele llegar a los 40°C en verano y a menos de 0°C en invierno. La humedad promedio es de 62% y hay lluvias fuertes durante los meses de agosto, septiembre y octubre. Hay una pequeña región desértica al noroeste y una franja de clima templado en las partes altas de la Sierra, al centro y sur, con una temperatura promedio de 14°C (<http://www.nl.gob.mx/>).

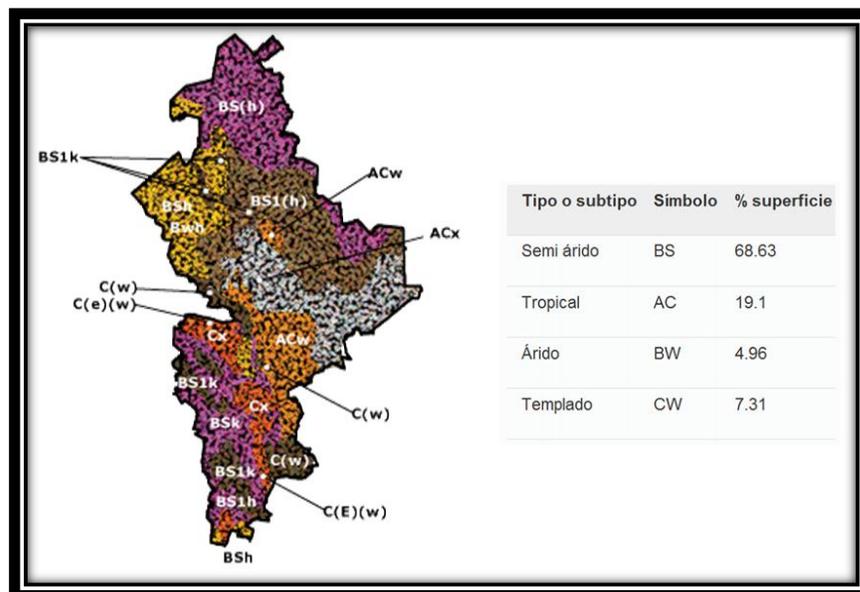


Figura 9. Tipos de clima en el Estado de Nuevo León.

3.1.4 Tipo de vegetación.

Con fines de este estudio y para una mayor interpretación de los tipos de vegetación presentes en la subcuenca río La Silla, ésta ha sido dividida en 3 partes. Dicha división se presenta de la siguiente manera:

Zona 1: Ésta área comprende desde la parte alta de la subcuenca donde nace el río La Silla continuando aguas abajo hasta comienzos del área metropolitana de la Ciudad de Monterrey, siendo dividida de las otras áreas a considerar en esta subcuenca por la carretera No. 85 conocida como Carretera Nacional, específicamente en el Cañón ‘El Diente’. La superficie del área es de 83 km^2 aproximadamente y se incluyen dentro de la misma ambas márgenes de la corriente (figura 10). Comprende parte de los municipios de Santiago, Monterrey y San Pedro Garza García, Nuevo León.

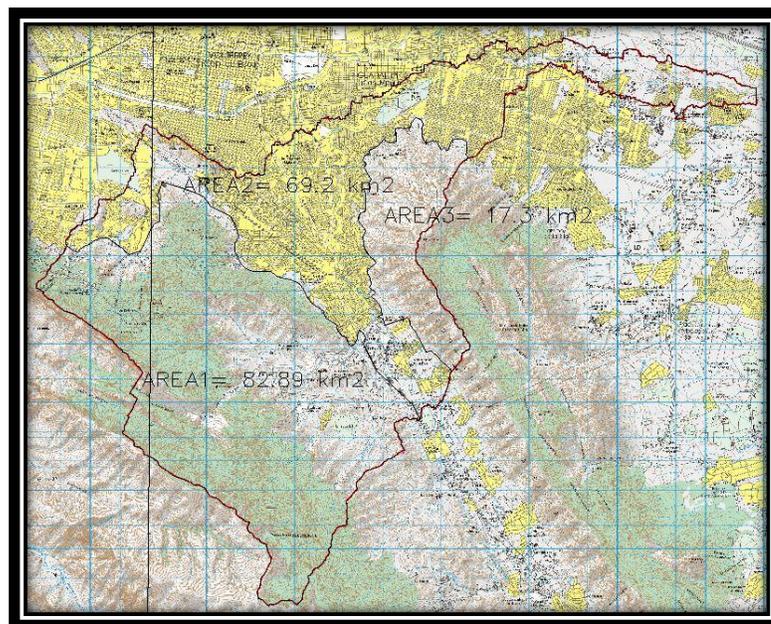


Figura 10. Zonas de tipos de vegetación de la cuenca del río La Silla.

Zona 2: Ésta área se delimitó a partir de la colonia ‘La Estanzuela’ continuando aguas abajo hasta desembocar al río Santa Catarina. Específicamente esta área considera el margen izquierdo de la corriente (tomando como referencia desde donde nace el río continuando aguas abajo), con una superficie de 69 km² aproximadamente. Comprende parte de los municipios de Monterrey, San Pedro Garza García y Guadalupe, Nuevo León.

Zona 3: Ésta área de la subcuenca se delimitó a partir de la colonia ‘La Estanzuela’ continuando aguas abajo hasta desembocar al río Santa Catarina. Específicamente esta área considera el margen derecho de la corriente (tomando como referencia desde donde nace el río continuando aguas abajo), con una superficie de 17 km² aproximadamente y comprende parte de los municipios de Monterrey y Guadalupe Nuevo León.

3.1.5 Características fisiográficas.

Las características fisiográficas de una cuenca desempeñan un papel muy importante en el estudio y comportamiento de algunos de los componentes del ciclo hidrológico, tales como el escurrimiento superficial, infiltración, evapotranspiración, percolación, entre otros (Magaña-Hernández, 2010). Los parámetros fisiográficos de la cuenca del río La Silla se obtuvieron de forma automatizada mediante la aplicación de un módulo hidrogeomático implementado en Idrisi. Para esto, se empleó un Modelo Digital de Elevación de la Zona en estudio, así como el archivo en formato raster del perímetro de la cuenca. La tabla 2 muestra los parámetros fisiográficos que se consideran en la investigación, así como su forma de obtención.

Tabla 2. Parámetros fisiográficos de la cuenca del río La Silla.

| Parámetro | Descripción | Unidad | Forma de obtención |
|-----------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| A | Área de la cuenca. | km ² | Automática |
| P | Perímetro de la cuenca. | km | Automática |
| AltMedia | Altitud media de la cuenca. | m.s.n.m | Automática |
| AltMax | Altitud máxima de la cuenca | m.s.n.m | Automática |
| AltMin | Altitud mínima de la cuenca | m.s.n.m | Automática |
| Sc | Pendiente media de la cuenca. | % | Automática |
| Lcp | Longitud del cauce principal. | km | Automática |
| Scp | Pendiente del cauce principal. | m/m | Automática |
| Kc | Coefficiente de compacidad | Km/km | Automática |
| Rd | Radio de circularidad. | km ² /km ² | Automática |
| Rhp | Relación hipsométrica. | adimensional | Automática |

3.1.6 Estratigrafía.

La geología del Estado de Nuevo León es compleja y ha sido estudiada desde varios enfoques. De manera general, las unidades litoestratigráficas presentes en el Estado se pueden agrupar en dos grandes conjuntos: el primero se caracteriza por depósitos marinos con un alcance estratigráfico desde el Jurásico Superior hasta la parte baja del Paleoceno mientras que el segundo, de naturaleza continental, corresponde a depósitos de edad terciaria y cuaternaria.

Las rocas del primer conjunto, están constituidas en su parte inferior por una unidad basal de yeso y/o anhidritas, sobre la cual descansa una potente secuencia de rocas carbonatadas; hacia la parte superior el conjunto presenta una mayor influencia de terrígenos y las rocas carbonatadas se vuelven menos abundantes, para llegar a la cima con un desarrollo de depósitos de tipo flysch. La parte inferior de este conjunto marino se encuentra, por lo general, formando las sierras, donde hay asociadas capas intercaladas de

lutitas y areniscas; en tanto que la mitad superior de este conjunto se encuentra en las partes bajas formando los valles (Estado de Nuevo León, 2010)

Dentro de la cuenca del río La Silla, debido a la diversidad de los materiales del sitio, la estratigrafía se divide en dos unidades. La primera unidad está conformada por suelos gruesos: gravas con arcilla, grava arcillosa con arena, grava arcillo limosa con arena, grava limosa con arena, gravas y boleos, arena arcillo limosa con grava, arena limosa con grava, arcilla café con gravas, arcilla limosa con arena, arcilla limosa arenosa, arcilla limosa arenosa con gravas, arcilla con arena. Por otro lado, la segunda unidad, el basamento rocoso, está conformado principalmente por lutita color café o gris, así como también se ha detectado aflorando en el fondo del cauce la roca caliza cerca del Parque Ecológico la Silla.

3.2 Modelación hidrológica CEQUeau.

Los datos requeridos por el modelo distribuido CEQUeau se obtienen de forma automatizada empleando un módulo hidrogeomático que trabaja dentro de los SIG. La figura 11 muestra la secuencia para obtener los archivos CEQUeau requeridos para la modelación hidrológica.

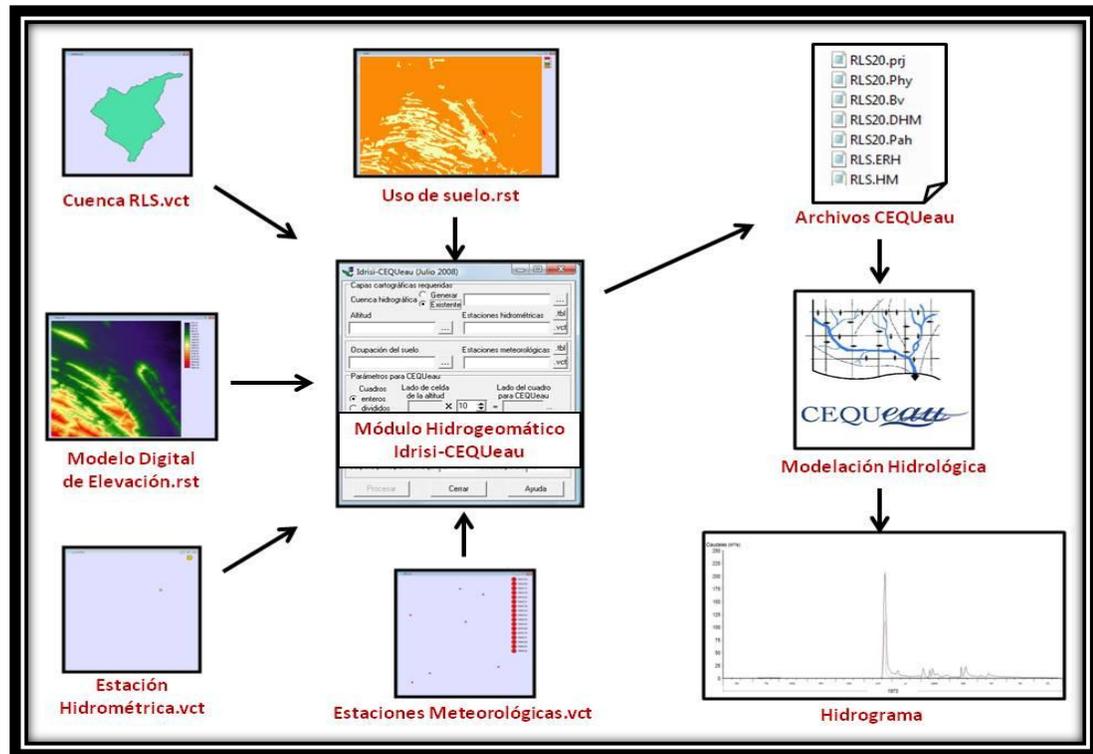


Figura 11. Secuencia de obtención de archivos necesarios para la modelación hidrológica empleando el modelo CEQUeau.

3.2.1 Módulo hidrogeomático Idrisi-CEQUeau.

El módulo hidrogeomático Idrisi-CEQUeau es utilizado dentro del SIG Idrisi Andes. El objetivo de aplicación de esta herramienta es la obtención de la información requerida por CEQUeau de forma rápida y eficiente, reduciendo los errores humanos y la pérdida de tiempo al generar la información manualmente.

El módulo hidrogeomático requiere de la siguiente información para generar los archivos deseados por CEQUeau:

- a) Modelo Digital de Elevación en formato raster de la zona de estudio en coordenadas UTM.

- b) Una imagen raster de la ocupación del suelo reclasificada en el formato requerido por CEQUeau (lagos, bosques y ciénegas).
- c) Una capa vectorial de la ubicación de las estaciones meteorológicas.
- d) Una capa vectorial de la ubicación de la estación hidrométrica 24387 – Los Lermas, la cual es el punto de análisis.
- e) Una capa vectorial del parteaguas o límite de la cuenca, obtenida en el mismo módulo hidrogeomático utilizando como datos de entrada el MDE y la capa vectorial de la estación hidrométrica de la zona de estudio.

Específicamente, éste módulo hidrogeomático permite obtener información fisiográfica (ocupación del suelo, altitudes y sentidos del flujo), así como un archivo de proyecto para el modelo CEQUeau con extensión *.PRJ, que permite precisar la ruta y el nombre de todos los archivos a procesar por el modelo, los cuales son:

- a) Archivos de datos fisiográficos (*.PHY).
- b) Archivo de parámetros de cuenca, (*.BV).
- c) Archivo de datos hidrometeorológicos, (*.DHM).
- d) Archivo de parámetros del modelo, (*.PAH).

3.2.2 Obtención de la base de geodatos requerida por el módulo Idrisi-CEQUeau.

La imagen del MDE fue generada por Interferometría utilizando un radar de apertura sintética (Foni y Seal, 2003). Ésta imagen se obtuvo en coordenadas geográficas del Seamless Data Distribution System, Herat Resources Observation and Science del US Geological Survey (USGS), y posteriormente se importó en Idrisi, transformándola a coordenadas UTM. Este modelo se encuentra dentro de las coordenadas $X_1=350800$,

$Y_1=2814400$ (esquina inferior izquierda), y $X_2=386600$, $Y_2=2849600$ (esquina superior derecha), el cual abarca la zona de estudio, como lo muestra la figura 12.

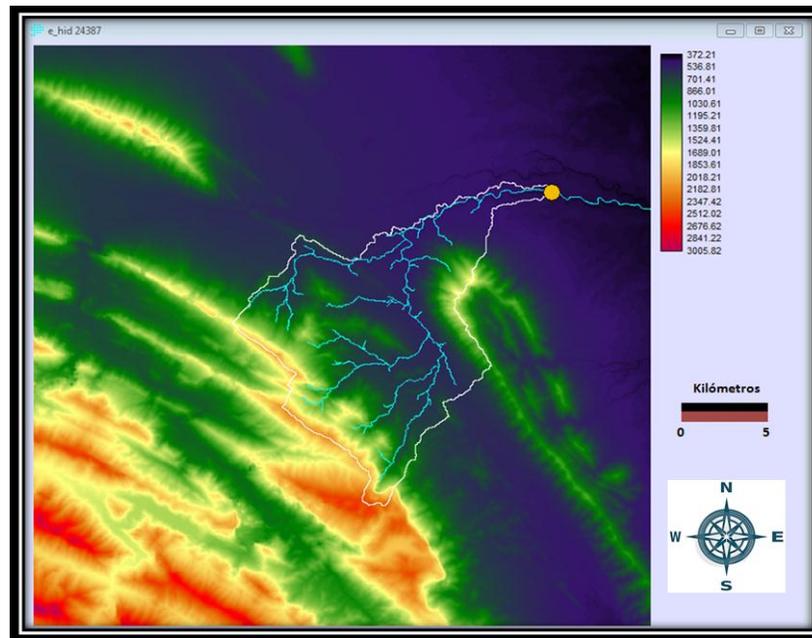


Figura 12. Modelo Digital de Elevación (MDE) de la cuenca del Río La Silla.

El modelo hidrológico CEQUeau requiere adicionalmente como dato de entrada la ocupación del suelo de la zona de estudio, para así llevar a cabo la simulación hidrológica. Se utilizó un mapa edafológico de la República Mexicana en formato shapefile de Arc View que se obtuvo de la Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad (CONABIO, 2011). Básicamente, el procedimiento para generar la imagen en formato "raster" requerida por CEQUeau, consistió en la obtención del mapa de ocupación de suelo de la República Mexicana de la página de internet de la CONABIO en formato "shapefile", la cual se reclasificó en Arc View en cuatro tipos: 1) Lagos y cuerpos de agua territoriales; 2) Todas las categorías de bosques

y selvas; 3) Ciénegas y pantanos; 4) Otros. Se generó un archivo de tipo “shapefile” con la información reclasificada de la ocupación del suelo de la cuenca, utilizando las coordenadas extremas del MDE. Se importó el “shapefile” a Idrisi, para convertirlo de formato vectorial a "raster", con las mismas dimensiones del MDE. En la figura 13 se muestra la imagen reclasificada de la ocupación del suelo en formato "raster" de la cuenca del río La Silla.

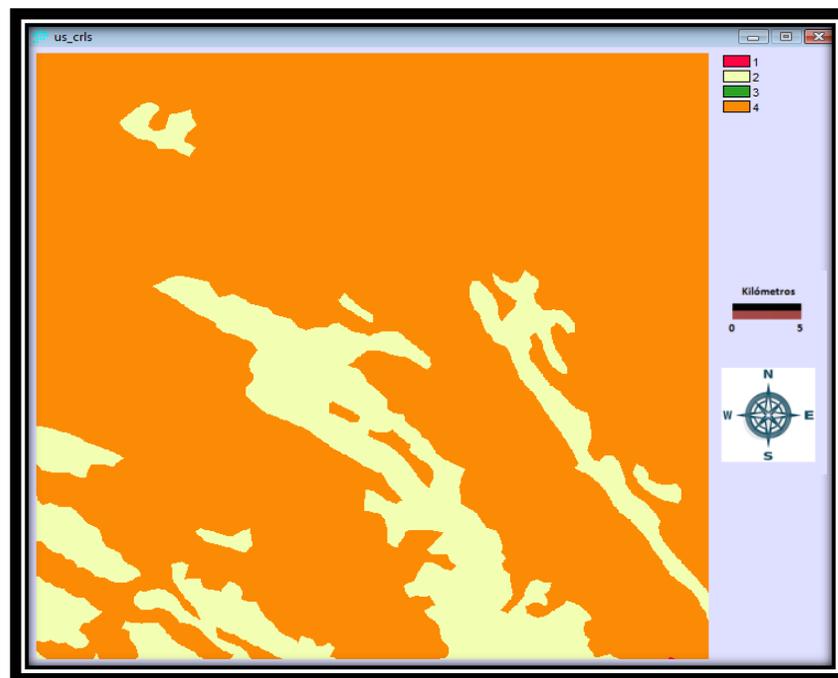


Figura 13. Imagen raster de ocupación de suelo reclasificada de la cuenca del río La Silla.

La imagen vectorial del parteaguas de la cuenca se obtiene empleando el módulo hidrogeomático Idrisi-CEQUeau, teniendo como archivos de entrada el Modelo Digital de Elevación, así como la capa vectorial de la estación hidrométrica, la cual es el punto

de análisis de nuestro estudio. A partir de ese punto, el módulo hidrogeomático genera una imagen vectorial del parteaguas de la cuenca (figura 14).

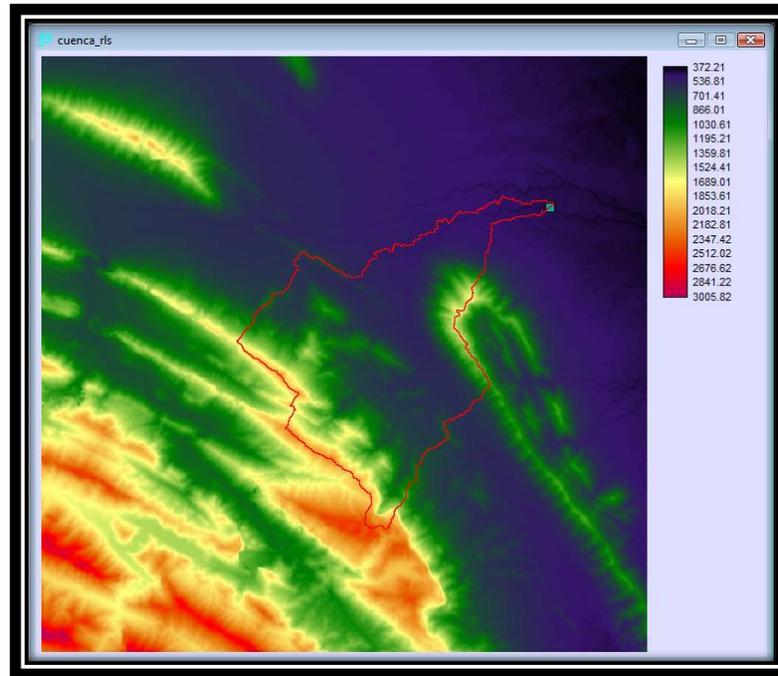


Figura 14. Imagen vectorial del parteaguas de la cuenca del río La Silla.

La capa vectorial de las estaciones meteorológicas, así como la capa vectorial de la estación hidrométrica Los Lermas se obtienen utilizando el SIG Idrisi *Andes*. Esto se llevó a cabo convirtiendo las coordenadas geográficas de cada una de las estaciones meteorológicas y de la estación hidrométrica Los Lermas a coordenadas UTM. Después, se crearon 2 tablas en el programa Microsoft Excel, una para las estaciones meteorológicas y otra para la estación hidrométrica, conteniendo la clave de cada estación y las coordenadas (x,y), para posteriormente importarlas a Idrisi *Andes* utilizando la función DATABASE WORKSHOP, creándose tanto la capa vectorial de las estaciones

meteorológicas (Figura 15), como la capa vectorial de la estación hidrométrica (Figura 16).

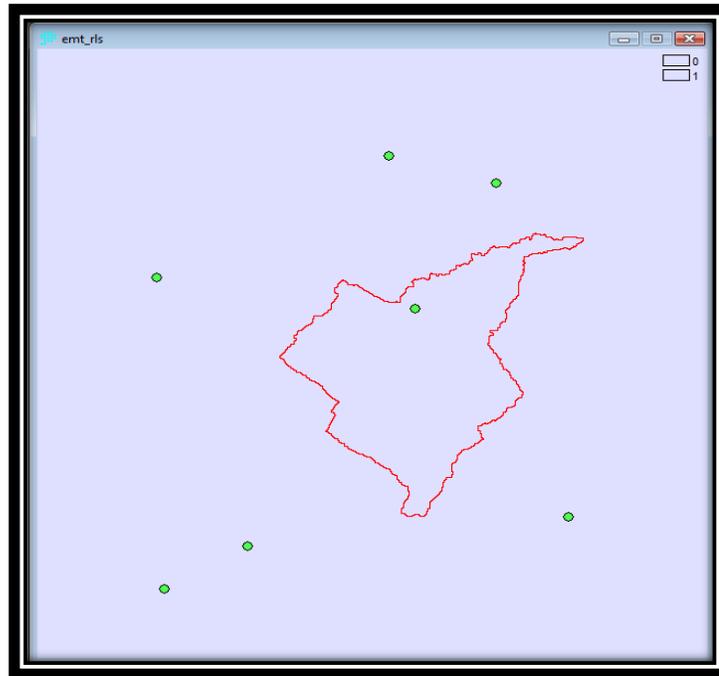


Figura 15. Imagen vectorial de las estaciones meteorológicas (puntos verdes), ubicadas dentro y fuera del parteaguas de la cuenca (línea roja).

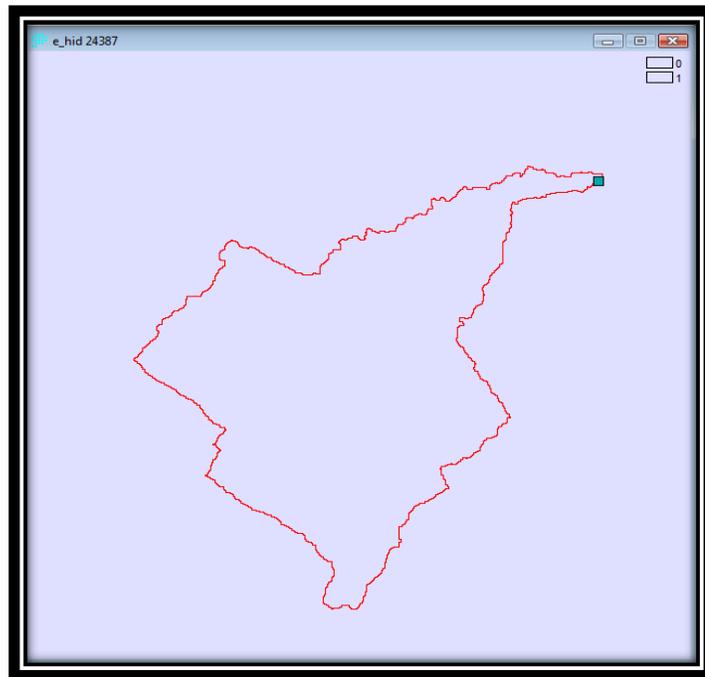


Figura 16. Imagen vectorial de la estación hidrométrica (punto verde), la cual representa el punto de análisis de la cuenca del río La Silla (línea roja).

3.2.3 Aplicación del modelo CEQUeau.

Dentro del modelo hidrológico CEQUeau, se cargó el archivo con extensión *.PRJ generado por el módulo hidrogeomático Idrisi-CEQUeau, el cual contiene la ruta y el nombre de todos los archivos a procesar (*.PHY, *.VB, *.DHM, y *.PAH).

Para realizar las simulaciones dentro del modelo, el primer paso consistió en la preparación de la información fisiográfica de la cuenca, utilizando el módulo de preparación de archivos fisiográficos con el que cuenta el modelo. CEQUeau generó un archivo de “Precisión de Superficies (*.EBV)”, en el cual muestra la superficie real de la cuenca y la superficie calculada por el modelo, hasta la estación hidrométrica Los Lermas.

El siguiente paso fue realizar la preparación de la información hidrometeorológica (*.DHM), la cual generó un archivo con extensión *.HMC, donde se archivan los resultados generales para ser utilizados por CEQUeau. También, CEQUeau generó un archivo con extensión *.HMN, que contiene los promedios mensuales y anuales de cada una de las variables meteorológicas (precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima).

3.2.4 Calibración y validación del modelo hidrológico CEQUeau.

La simulación hidrológica de la cuenca del río La Silla hasta la estación hidrométrica Los Lermas, se realizó con los caudales medios diarios para el periodo de 1973 a 1994 (21 años), utilizando para la calibración el periodo de 1973 a 1988, y para la validación el periodo de 1989 a 1994. El proceso de calibración se llevó a cabo mediante la técnica de prueba y error, y el empleo de la herramienta de optimización de parámetros con que cuenta el modelo. La técnica de prueba y error consiste en ir variando los parámetros del modelo hasta que los caudales observados y simulados sean lo más similar posible.

Primero, se realizó un balance para todo el periodo de simulación (1973 a 1994), el cual consistió en optimizar el exponente XAA y el índice XIT de la fórmula modificada de Thornthwaite para el cálculo de la evapotranspiración y después se utilizó la técnica de prueba y error, hasta que las láminas anuales de los caudales observados y calculados fueran lo más similares posibles.

Posteriormente para el periodo de 1973 a 1988 (etapa de calibración), se optimizaron los parámetros utilizando la herramienta automatizada con que cuenta el modelo hidrológico CEQUeau, ajustándose dichos parámetros utilizando la técnica de prueba y error, hasta que coincidan en la medida de lo posible las láminas de los caudales observados y simulados.

Finalmente, se validó el modelo para el periodo de 1989 a 1994, verificándose los parámetros obtenidos durante la etapa de calibración.

3.2.5 Obtención de los porcentajes de vegetación.

La metodología utilizada para obtener los porcentajes de vegetación y por consiguiente, de expansión urbana en la cuenca del río La Silla de cada uno de los años en estudio (1995, 1999, 2006 y 2009), es presentada en los siguientes pasos, así como en la figura 17:

- a) Obtención de información georreferenciada histórica y actual de la zona en estudio, para realizar la comparación de expansión urbana.
- b) Se exportó la capa vectorial de la malla de cuadros que discretiza a la cuenca generada por el módulo hidrogeomático Idrisi-CEQUeau, así como el perímetro de la cuenca, de tal forma que puedan ser estos archivos ejecutados en el software AutoCAD Civil 3D 2010.
- c) Utilizando la información georreferenciada (imágenes satelitales), en conjunto con la capa vectorial exportada del SIG Idrisi de la malla de cuadros y el

perímetro de la cuenca, se analizó cuadro por cuadro el porcentaje de vegetación dentro del software AutoCAD Civil 3D 2010, utilizando la función polilínea y el comando área para marcar zonas de vegetación, así como para conocer el valor de superficie que encierra esa polilínea, y relacionándolo con el área total, se obtuvo el porcentaje de vegetación por cuadro.

- d) Se obtuvo la información de cobertura vegetal necesaria de cada cuadro, la cual nos servirá para realizar las simulaciones del ciclo hidrológico en el modelo CEQUeau.

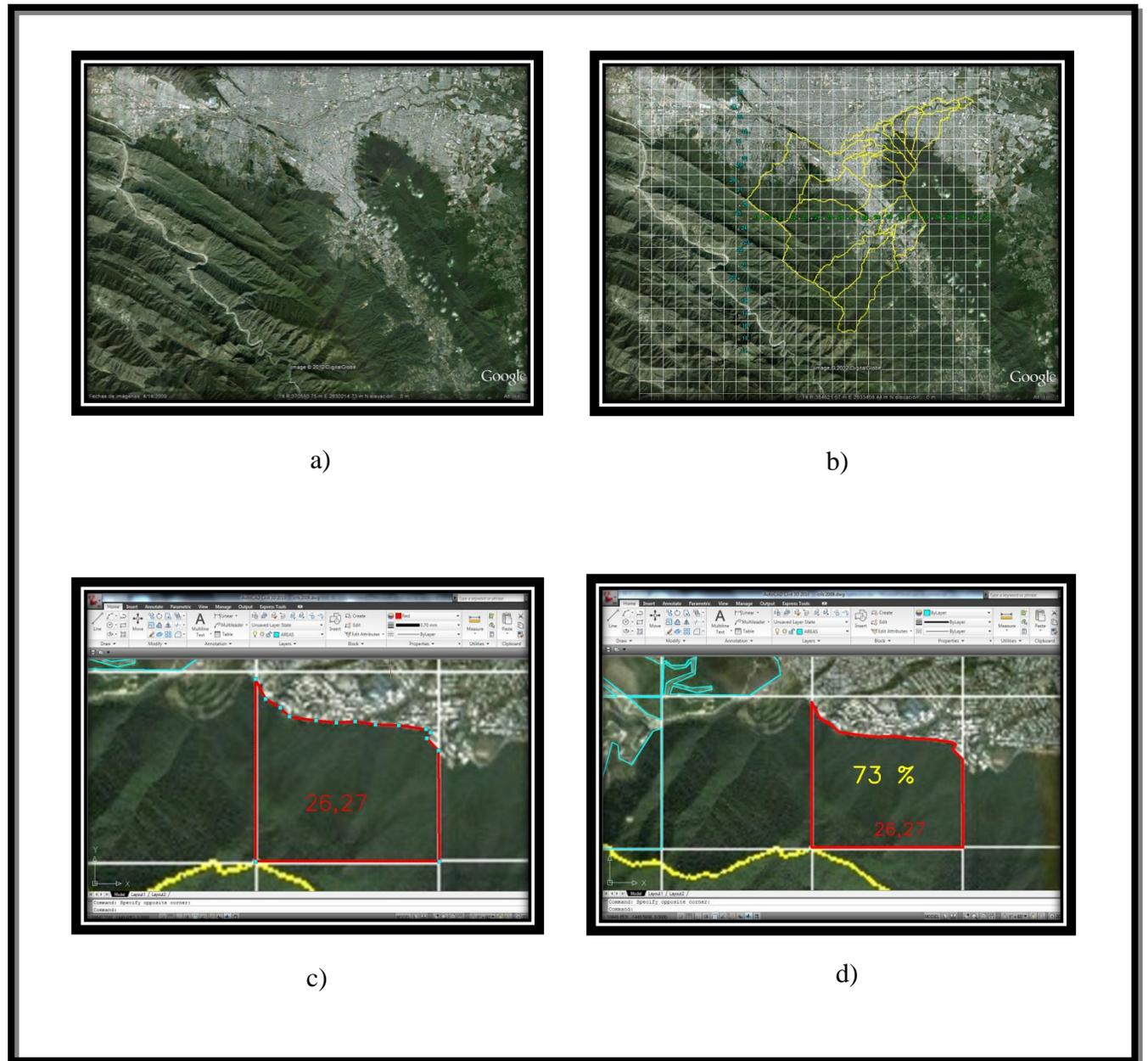


Figura 17. Secuencia de obtención de áreas de vegetación en cada cuadro que discretiza a la cuenca del río La Silla.

El siguiente paso teniendo cargados los porcentajes de vegetación, es la preparación de los archivos fisiográficos e hidrometeorológicos (a), y una vez aceptada esta preparación, se abre el archivo de parámetros de modelo (b) para ajustar el periodo de simulación deseado (c), por ejemplo, teniendo cargados los porcentajes de vegetación del año 1995, el primer periodo de simulación sería desde el primer día de enero, hasta el último día de diciembre (19950101 – 19951231) tal como lo muestra la siguiente figura.

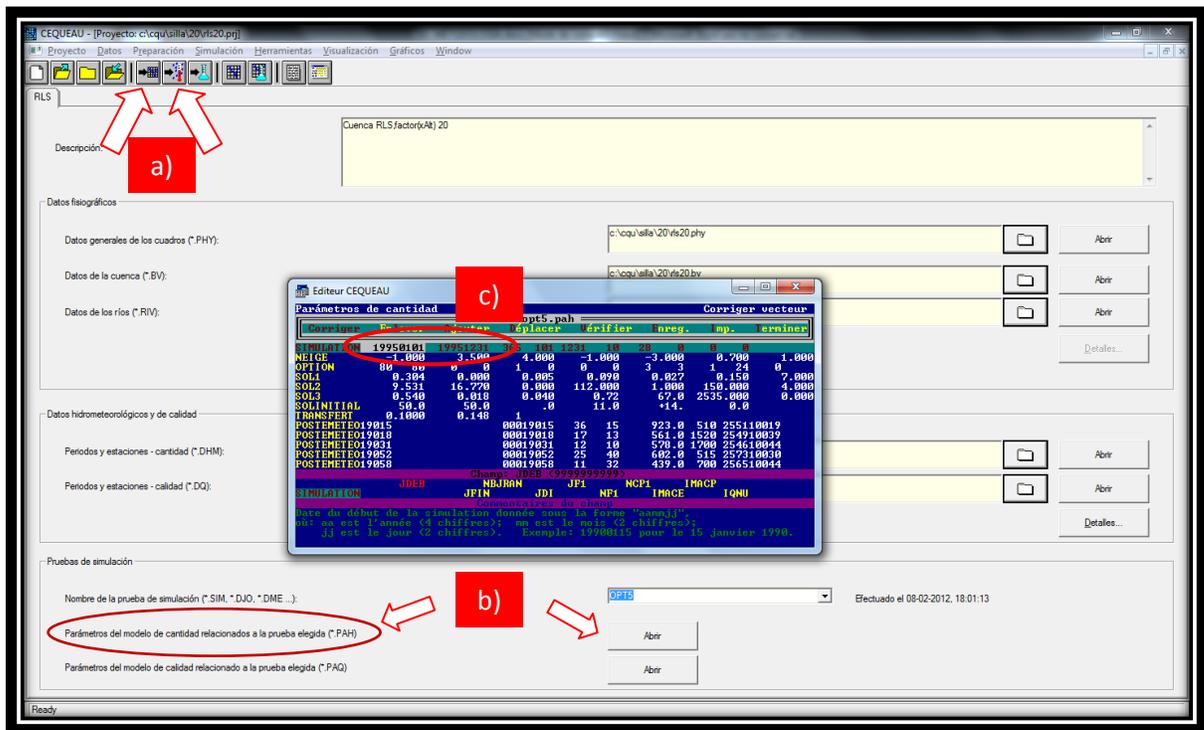


Figura 19. Secuencia para la preparación de archivos fisiográficos e hidrometeorológicos, así como para indicar el periodo de simulación en el modelo hidrológico CEQUEAU.

Posteriormente, se realiza la simulación hidrológica (a) y siendo aceptada por el modelo, se revisan los resultados obtenidos en la simulación, consultando la sección de

Caudales/Niveles Temporales, dentro del menú Gráficos (b)), en el cual se muestra el hidrograma de escurrimiento producto de la simulación (c), indicando el caudal medio observado y calculado, el coeficiente de Nash, la lámina de escurrimiento, así como el caudal pico.

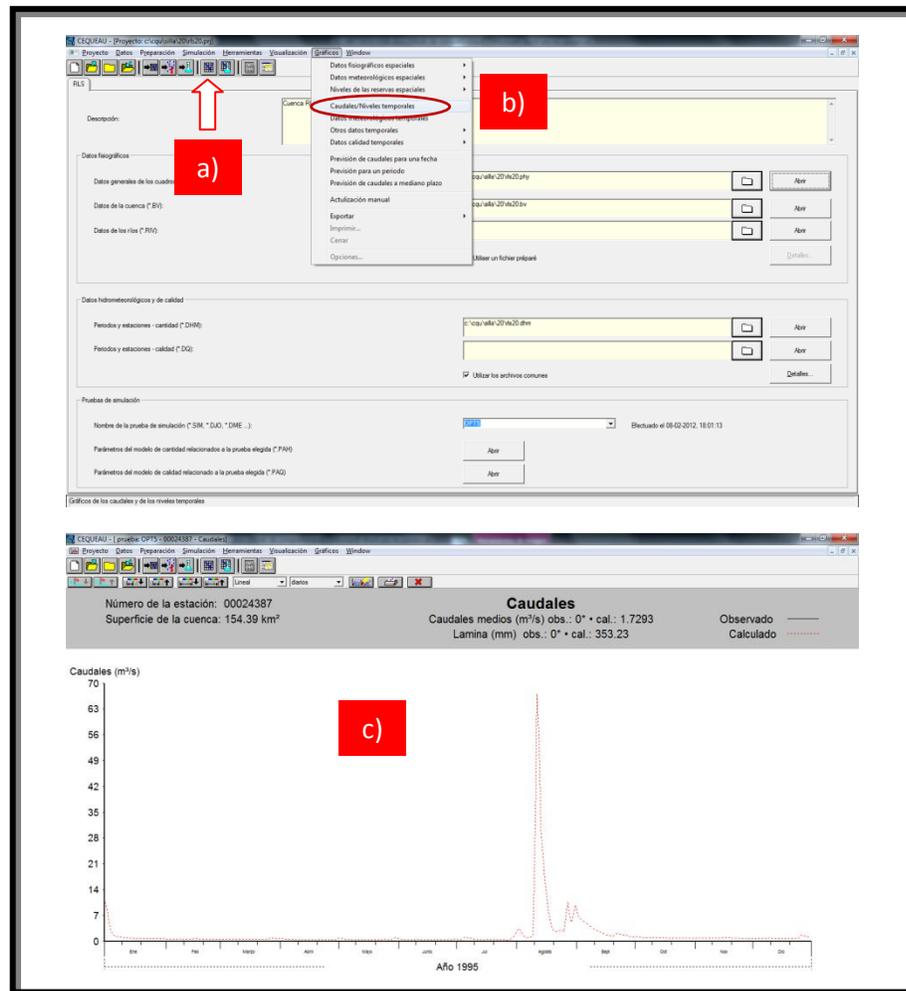


Figura 20. Secuencia para realizar la simulación hidrológica, así como para la revisión de los resultados obtenidos dentro del modelo hidrológico CEQUEAU.

Con los mismos datos de vegetación del año 1995 cargados en el archivo de parámetros fisiográficos, se modifica el periodo de simulación para los años de los que se tiene información de vegetación, esto es, desde el primer día de enero, hasta el último día de diciembre del año 1999, así como para el año 2006 y el 2009, siguiendo los mismos pasos de la preparación de archivos fisiográficos e hidrometeorológicos y se realiza la simulación para obtener los resultados y realizar comparaciones.

De igual manera, se realiza la misma metodología con los datos de vegetación de los años 1999, 2006 y 2009, modificando para cada uno de estos escenarios de cobertura vegetal, los periodos de simulación (1995, 1999, 2006 y 2009).

Por otra parte, se consideraron dos escenarios futuros dentro de la cuenca del río La Silla. En el primer escenario se consideró de manera aleatoria el año 2020, donde se estimó el porcentaje total de urbanización mediante una extrapolación de los valores obtenidos de los años 1995, 1999, 2006 y 2009. De esta manera, a partir del valor encontrado se ajustaron los porcentajes de cada cuadro que discretiza la cuenca, de tal forma que en conjunto representen el porcentaje total urbanizado obtenido en la gráfica en el año 2020.

Al igual que en los escenarios anteriores, se realizó la simulación del año 2020 en el modelo hidrológico CEQUeau con los porcentajes de cada cuadro obtenidos, y con datos de precipitación igual a los ocurridos en el año 2005 (Huracán Emily).

El segundo escenario fue desarrollado bajo el decreto realizado en el año de 1939 el cual declara como área natural protegida, con el carácter de parque nacional, la región conocida con el nombre de Cumbres de Monterrey, ubicada en los municipios de Allende, García, Montemorelos, Monterrey, Rayones, Santa Catarina, Santiago y San Pedro Garza García, en el Estado de Nuevo León. Dentro del documento se indican los límites de esta zona, descrita también en una carta editada por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI – Dirección de Reserva), la cual se encuentra en una escala de 1:150,000 (figura 21).

La metodología que se utilizó para realizar este escenario es la siguiente:

La carta a escala editada por CONANP e INEGI (Dirección Reserva), se importó en el software AutoCAD Civil 3D 2010.

- a) Se trazó una polilínea que siga la delimitación del Parque Nacional en la zona de la cuenca del río La Silla.
- b) La polilínea trazada se georreferenció y exportó mediante la herramienta “Publish to Earth” para poder ser visualizada en Google Earth.
- c) Además de activar la visualización del límite del Parque Nacional, en Google Earth se activó la capa de la cuenca del río La Silla, así como la malla de cuadros que

discretiza a la cuenca, las cuales fueron utilizadas para la realización de los escenarios anteriores.

- d) Se evaluaron los cuadros para determinar el porcentaje de vegetación; si están dentro del límite del Parque Nacional Cumbres de Monterrey, tendrán un valor de 100%, y si no están dentro de éste límite, el valor será 0%.

- e) Estos valores de porcentaje de vegetación de cada cuadro, obtenidos del análisis anterior, se introdujeron al archivo de parámetros fisiográficos localizado dentro del modelo CEQUeau, para la realización de la simulación hidrológica con estos datos de cobertura vegetal, así como también con los datos de lluvias del año 2005 (Huracán Emily).

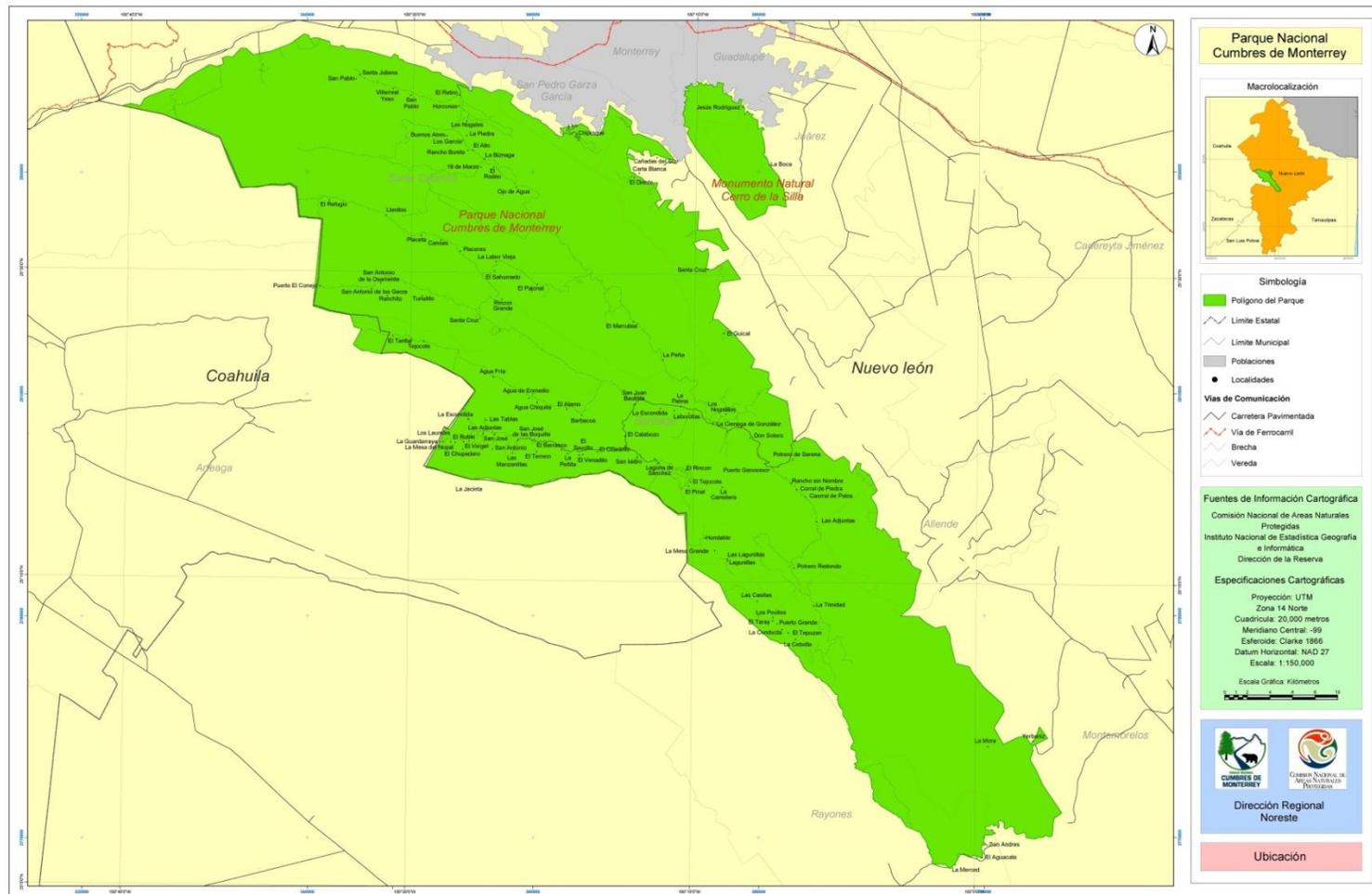


Figura 21. Ubicación del Área Natural Protegida “Parque Nacional Cumbres de Monterrey” (Comisión Nacional de Áreas Protegidas, INEGI 2012).

4. Resultados y discusión

4.1 Parámetros fisiográficos.

En la tabla 3, se muestran los parámetros fisiográficos de la cuenca del río La Silla obtenidos automáticamente mediante el módulo Idrisi-CEQUEAU.

Tabla 3. Valores obtenidos de forma automatizada de los parámetros fisiográficos de la cuenca del río La Silla.

| Parámetro | Descripción | Unidad | Valor |
|-----------|--------------------------------|----------------------------------|--------|
| A | Área de la cuenca. | km ² | 154.41 |
| P | Perímetro de la cuenca. | km | 94.3 |
| AltMedia | Altitud media de la cuenca. | m.s.n.m | 891.48 |
| AltMax | Altitud máxima de la cuenca | m.s.n.m | 1443 |
| AltMin | Altitud mínima de la cuenca | m.s.n.m | 426.45 |
| Sc | Pendiente media de la cuenca. | % | 34.31 |
| Lcp | Longitud del cauce principal. | km | 31.44 |
| Scp | Pendiente del cauce principal. | m/m | 0.032 |
| Kc | Coefficiente de compacidad | Km/km | 2.14 |
| Rd | Radio de circularidad. | km ² /km ² | 0.22 |
| Rhp | Relación hipsométrica. | adimensional | 3.17 |

La cuenca del río La Silla tiene una superficie de 154.04 km² y un perímetro de 94.3 km, así como una pendiente media de 34.31 %. El cauce principal tiene una longitud total de 31.44 km y una pendiente media de 3.2 %. Es una cuenca alargada con una altura media de 891.48 metros con respecto al nivel del mar.

4.2 Módulo hidrogeomático.

La aplicación del módulo hidrogeomático que trabaja dentro del SIG Idrisi Andes, generó de una manera automatizada los archivos CEQUeau utilizados en la modelación hidrológica de la cuenca del río La Silla. Así que, se obtuvieron dos tipos de resultados: a) Gráficos y b) Archivos de texto CEQUeau. Con respecto a los resultados gráficos, el módulo hidrogeomático generó una imagen con la delimitación de la cuenca, además de una capa vectorial con la malla de cuadros que discretiza a la cuenca, así como una capa vectorial que indica el sentido del flujo cuadro por cuadro hasta la salida de la cuenca (estación hidrométrica Los Lermas). La figura 22 muestra la cuenca del río La Silla discretizada o dividida por la malla de cuadros que generó el módulo hidrogeomático, el MDE de la zona de estudio y la red hidrográfica.

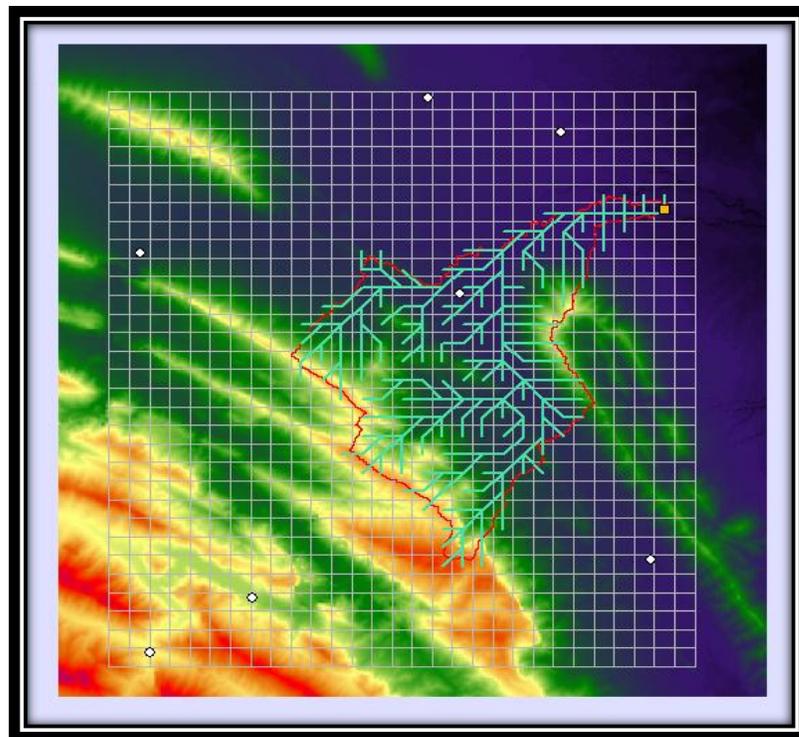


Figura 22. Discretización de la cuenca del río La Silla.

Los archivos generados por el módulo hidrogeomático a partir del MDE-SRTM son: 1) Archivo de datos fisiográficos (RLS20.PHY), 2) Archivos de datos de cuenca (RLS20.BV), 3) Archivos de datos hidrometeorológicos (RLS20.DHM) y 4) Archivo de parámetros del modelo (RLS20.PAH).

En la figura 23 se muestran los resultados obtenidos al ejecutar el archivo *.PRJ generado por el módulo hidrogeomático y realizando la preparación de los archivos fisiográficos, en los cuales el modelo distribuido CEQUEau reconstruyó la cuenca del río La Silla a partir de la estación hidrométrica Los Lermas. Esto dio como resultado un área de cuenca calculado por el modelo de 154.39 km², teniendo una variación de -0.01% con respecto al área obtenida por el módulo hidrogeomático que trabaja dentro de un SIG.

| NO. | ABCISSA I | ORDONNEE J | CODE | NUMERO C.P. | B.V. REEL KM2 | B.V. CALC. KM2 | ERREUR EN P.C. |
|----------|-----------|------------|------|-------------|---------------|----------------|----------------|
| 00024387 | 37 | 34 | A | 1 | 154.41 | 154.39 | -0.01 |

VECTEUR MARR INITIAL
0- 190 190 26 1 100 1000 1 1 0 0

NUMERO DES STATIONS HYDROMETRIQUES
00024387

NUMERO DES C.P. DES STATIONS HYDROMETRIQUES
1

Figura 23. Resultados obtenidos al realizar la preparación de los archivos fisiográficos obtenidos por el módulo hidrogeomático.

4.3 Calibración y validación.

La modelación hidrológica de la cuenca del río La Silla hasta la estación hidrométrica Los Lermas se efectuó con los caudales medios diarios para el periodo de 1973 a 1990. El modelo se calibró para el periodo de 1977 a 1990, y se validó para el periodo de 1973 a 1976. Se utilizó la herramienta de optimización de parámetros con la que cuenta el modelo hidrológico CEQUeau, así como el método de prueba y error, logrando obtener los siguientes valores representados en la figura 24, cuyas siglas son descritas en el capítulo 2.

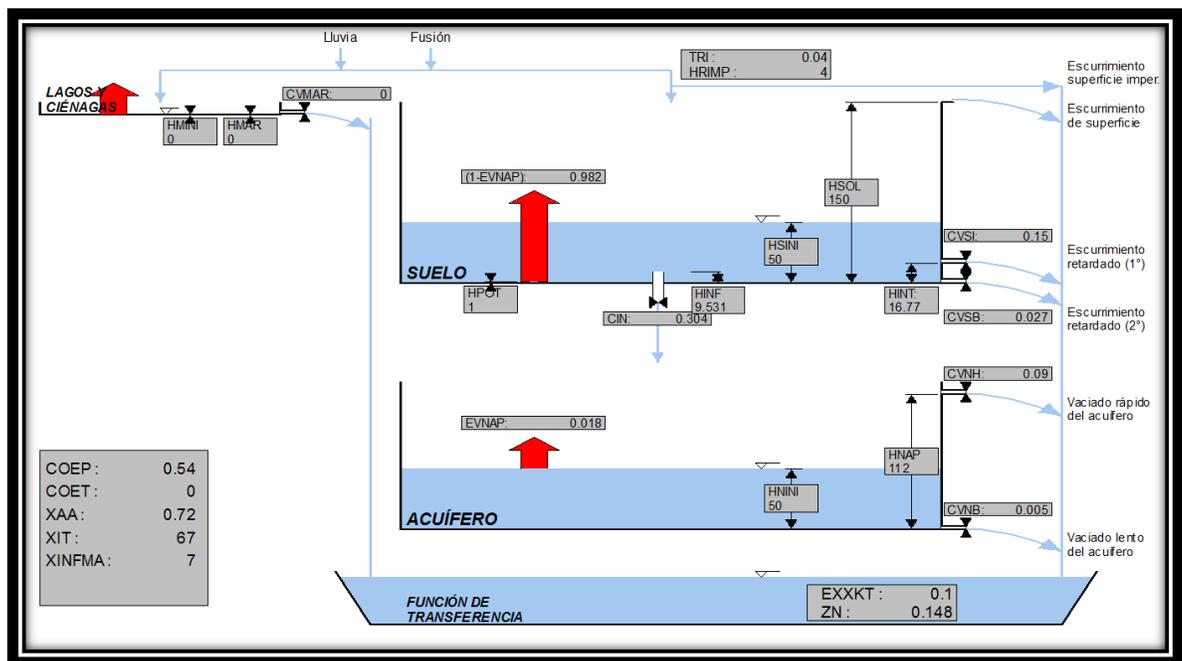


Figura 24. Valores de los parámetros del modelo hidrológico CEQUeau, producto del empleo de la herramienta de optimización y de la técnica de prueba y error.

Se calibró el modelo hidrológico con estos valores de parámetros, dando como resultado un coeficiente de Nash de 0.7 para el periodo de 1977 a 1990. Para la etapa de validación,

comprendida de 1973 a 1976, el coeficiente de Nash alcanzó un valor de 0.72, mientras que para el periodo global (1973 a 1990), el coeficiente de Nash fue de 0.79.

En general, los valores obtenidos en la etapa de calibración (1977 a 1990) y validación (1973 a 1976), así como para todo el periodo (1973 a 1990), son aceptables, lo cual indica que el modelo hidrológico CEQUEau simuló los caudales medios interanuales en la cuenca del río La silla con una buena aproximación a la realidad.

4.4 Porcentajes de vegetación en la cuenca del río La Silla.

Las imágenes satelitales de la zona de estudio se obtuvieron de registros históricos del Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI), así como del sitio web de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), las cuales cuentan con resolución adecuada que permite poder realizar el análisis de las zonas urbanas y de vegetación dentro de la cuenca del río La Silla.

La búsqueda de esta información nos dio como resultado la obtención de imágenes satelitales de los años 1995, 1999, 2005 y 2009, las cuales fueron satisfactorias para realizar el análisis dentro de la zona en estudio.

La imagen de 1995 se obtuvo de las bases de datos del INEGI, la cual es producto de fotografías aéreas (ortofotos) georreferenciadas, las cuales en conjunto representan gran parte de la Zona Metropolitana de Monterrey.

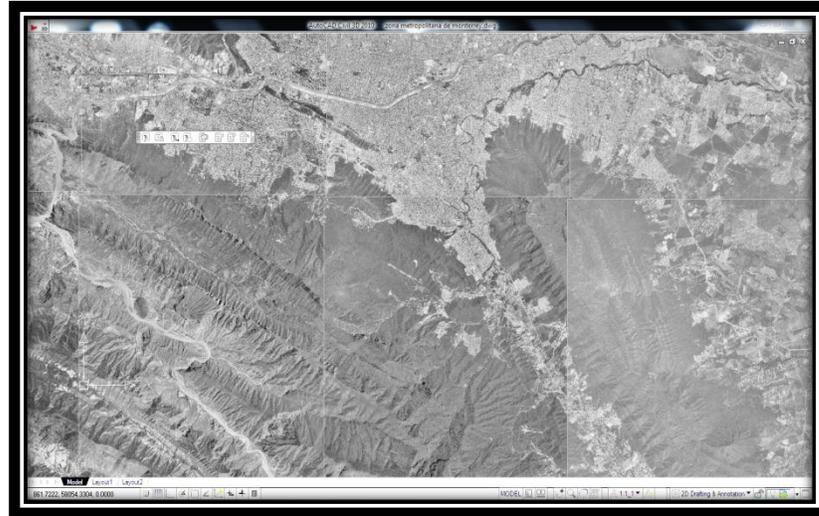


Figura 25. Imagen obtenida por ortofotografía de la Zona Metropolitana de Monterrey en el año de 1995 obtenida del INEGI (2011).

Por otra parte, la imagen del año 1999 se obtuvo del sitio web de la NASA (2012), en la cual es posible visualizar el área de estudio, como lo muestra la siguiente figura.



Figura 26. Imagen satelital de la Zona Metropolitana de Monterrey del año 1999, obtenida del sitio web de la NASA (2012).

Así mismo, se obtuvieron imágenes satelitales de la zona de estudio de los años 2006 y 2009, utilizando el programa informático Google Earth, el cual combina imágenes satelitales, mapas y el motor de búsqueda de Google que permite ver imágenes a escala de un lugar específico, además de contener imágenes históricas de determinadas áreas, como por ejemplo, del año 2005.

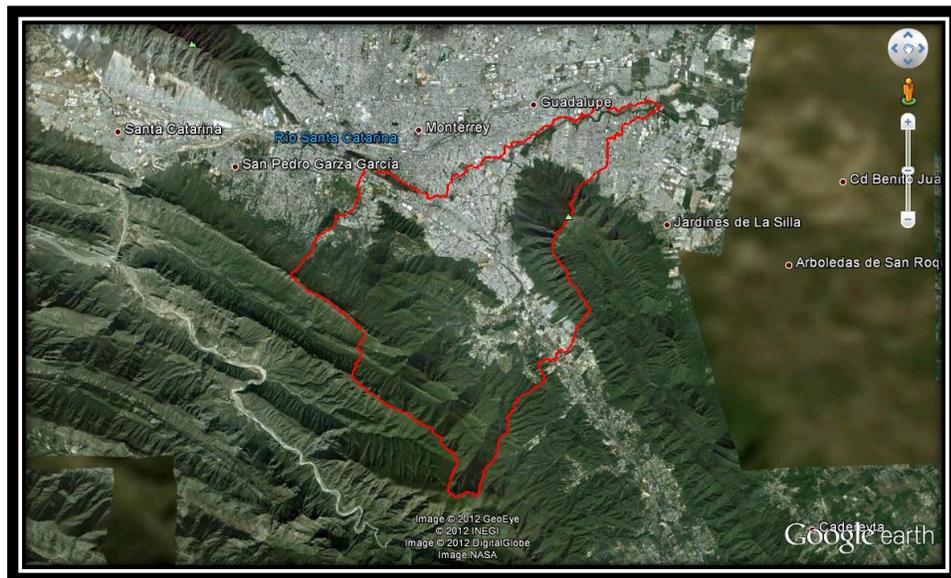


Figura 27. Imagen satelital del año 2005 de la Zona Metropolitana de Monterrey, obtenida del programa informático Google Earth (2012).

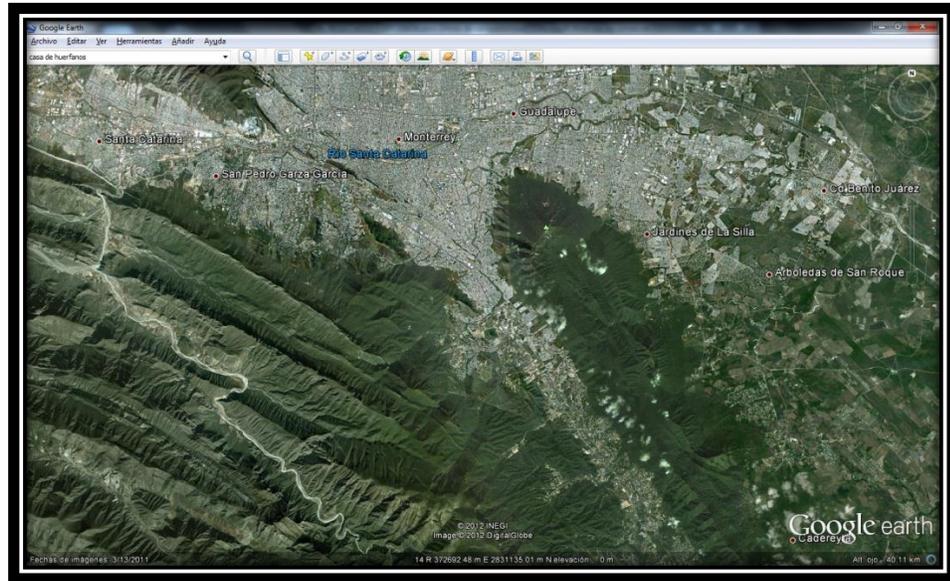


Figura 28. Imagen satelital del año 2009 de la Zona Metropolitana de Monterrey, obtenida del programa informático Google Earth (2012).

Por otro lado, se obtuvo el archivo de la malla de cuadros georreferenciado (.dwf), así como el parteaguas o perímetro de la cuenca, los cuales originalmente fueron generados por el SIG Idrisi (.vct), y exportándolos de tal manera que puedan ser reproducidos en el software Auto CAD. Esta malla de cuadros discretiza a la cuenca en cuadros enteros que representan 1km por lado de la zona en estudio.

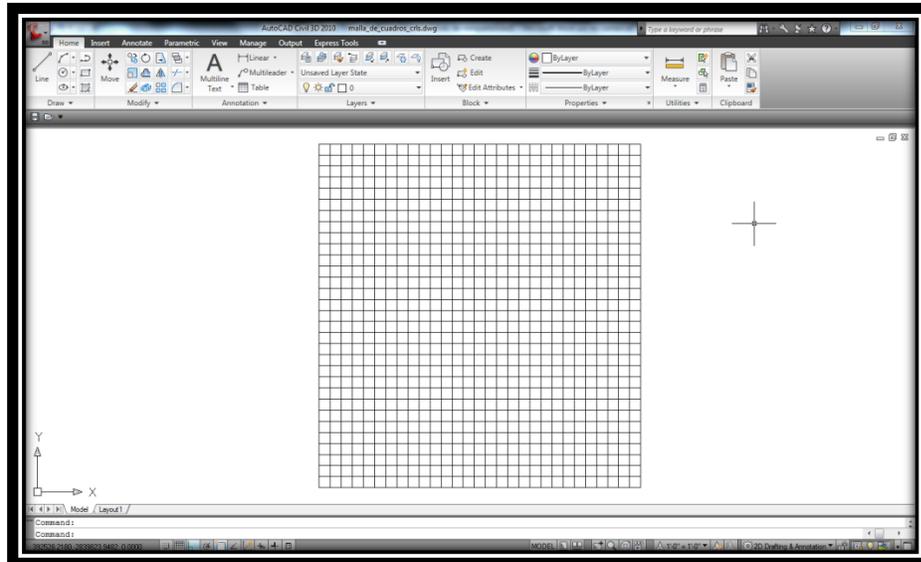


Figura 29. Archivo con extensión .dwf, que representa la malla que discretiza a la cuenca del río la Silla, obtenido del SIG Idrisi.

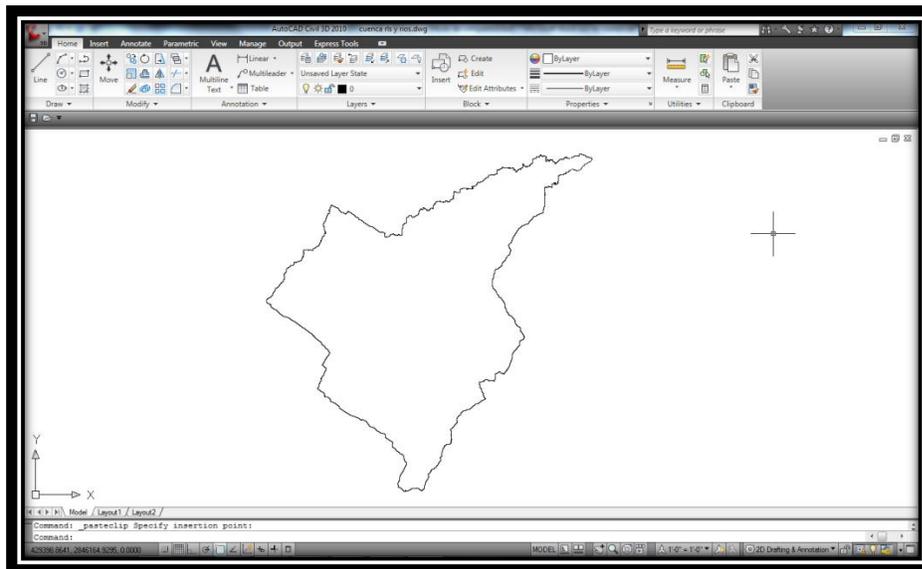


Figura 30. Archivo con extensión .dwf, que representa el parteaguas o perímetro de la cuenca del río la Silla, obtenido del SIG Idrisi.

Los porcentajes de cada cuadro, identificados con las mismas coordenadas que utiliza el modelo CEQUeau, fueron obtenidos de cada uno de los años de los cuales se tiene la imagen histórica. Los resultados obtenidos de cada año se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4. Porcentajes de vegetación de cada cuadro que discretiza a la cuenca.

| Coordenadas | | | | | % de vegetación | | | | |
|-------------|----|------|------|------|-----------------|--|--|--|--|
| i | j | 1995 | 1999 | 2005 | 2009 | | | | |
| 19 | 25 | 2 | 2 | 2 | 2 | | | | |
| 19 | 26 | 63 | 63 | 63 | 63 | | | | |
| 19 | 27 | 67 | 67 | 67 | 67 | | | | |
| 20 | 25 | 21 | 21 | 21 | 22 | | | | |
| 20 | 26 | 99 | 99 | 99 | 99 | | | | |
| 20 | 27 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 20 | 28 | 80 | 66 | 54 | 45 | | | | |
| 21 | 24 | 8 | 8 | 8 | 8 | | | | |
| 21 | 25 | 86 | 84 | 84 | 84 | | | | |
| 21 | 26 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 21 | 27 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 21 | 28 | 88 | 71 | 67 | 56 | | | | |
| 21 | 29 | 63 | 45 | 43 | 41 | | | | |
| 22 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 22 | 21 | 62 | 62 | 62 | 62 | | | | |
| 22 | 22 | 91 | 91 | 91 | 91 | | | | |
| 22 | 23 | 70 | 70 | 70 | 70 | | | | |
| 22 | 24 | 82 | 82 | 82 | 82 | | | | |
| 22 | 25 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 22 | 26 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 22 | 27 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 22 | 28 | 80 | 70 | 38 | 24 | | | | |
| 22 | 29 | 64 | 56 | 32 | 15 | | | | |
| 22 | 30 | 67 | 43 | 25 | 21 | | | | |
| 22 | 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 23 | 20 | 41 | 41 | 41 | 41 | | | | |
| 23 | 21 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 23 | 22 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 23 | 23 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 23 | 24 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 23 | 25 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 23 | 26 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 23 | 27 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 23 | 28 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 23 | 29 | 100 | 96 | 81 | 68 | | | | |
| 23 | 30 | 89 | 47 | 43 | 29 | | | | |
| 23 | 31 | 78 | 71 | 53 | 23 | | | | |
| 24 | 19 | 5 | 5 | 5 | 5 | | | | |
| 24 | 20 | 88 | 88 | 88 | 88 | | | | |
| 24 | 21 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 24 | 22 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 24 | 23 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 24 | 24 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 24 | 25 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 24 | 26 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 24 | 27 | 82 | 73 | 63 | 62 | | | | |
| 24 | 28 | 90 | 90 | 90 | 90 | | | | |
| 24 | 29 | 99 | 91 | 79 | 79 | | | | |
| 24 | 30 | 61 | 10 | 4 | 2 | | | | |
| 24 | 31 | 38 | 38 | 38 | 37 | | | | |
| 25 | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 25 | 19 | 62 | 62 | 61 | 61 | | | | |
| 25 | 20 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 25 | 21 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 25 | 22 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 25 | 23 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 25 | 24 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 25 | 25 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 25 | 26 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 25 | 27 | 89 | 88 | 88 | 88 | | | | |
| 25 | 28 | 83 | 71 | 58 | 53 | | | | |
| 25 | 29 | 62 | 47 | 25 | 18 | | | | |
| 25 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 26 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 26 | 16 | 42 | 42 | 42 | 42 | | | | |
| 26 | 17 | 20 | 20 | 20 | 20 | | | | |
| 26 | 18 | 66 | 66 | 66 | 66 | | | | |
| 26 | 19 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 26 | 20 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 26 | 21 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 26 | 22 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 26 | 23 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 26 | 24 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 26 | 25 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 26 | 26 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 26 | 27 | 78 | 78 | 73 | 73 | | | | |
| 26 | 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 26 | 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 26 | 30 | 16 | 16 | 10 | 0 | | | | |
| 26 | 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 27 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 27 | 16 | 81 | 80 | 80 | 80 | | | | |
| 27 | 17 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 27 | 18 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 27 | 19 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 27 | 20 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 27 | 21 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 27 | 22 | 100 | 91 | 86 | 85 | | | | |
| 27 | 23 | 100 | 82 | 60 | 62 | | | | |
| 27 | 24 | 100 | 82 | 85 | 86 | | | | |
| 27 | 25 | 100 | 86 | 83 | 83 | | | | |
| 27 | 26 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 27 | 27 | 66 | 54 | 51 | 50 | | | | |
| 27 | 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 27 | 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 27 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 27 | 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 27 | 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 27 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 27 | 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 27 | 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 28 | 16 | 6 | 6 | 6 | 6 | | | | |
| 28 | 17 | 60 | 60 | 59 | 59 | | | | |
| 28 | 18 | 100 | 100 | 98 | 98 | | | | |
| 28 | 19 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 28 | 20 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 28 | 21 | 100 | 100 | 98 | 96 | | | | |
| 28 | 22 | 89 | 69 | 53 | 34 | | | | |
| 28 | 23 | 97 | 54 | 40 | 32 | | | | |
| 28 | 24 | 88 | 54 | 42 | 18 | | | | |
| 28 | 25 | 100 | 83 | 79 | 79 | | | | |
| 28 | 26 | 60 | 41 | 40 | 40 | | | | |
| 28 | 27 | 26 | 16 | 16 | 13 | | | | |
| 28 | 28 | 18 | 12 | 11 | 11 | | | | |
| 28 | 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 28 | 30 | 6 | 6 | 6 | 6 | | | | |
| 28 | 31 | 15 | 15 | 15 | 15 | | | | |
| 28 | 32 | 29 | 26 | 26 | 20 | | | | |
| 29 | 18 | 15 | 15 | 15 | 15 | | | | |
| 29 | 19 | 55 | 55 | 55 | 55 | | | | |
| 29 | 20 | 94 | 94 | 94 | 94 | | | | |
| 29 | 21 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 29 | 22 | 92 | 92 | 92 | 92 | | | | |
| 29 | 23 | 97 | 93 | 58 | 56 | | | | |
| 29 | 24 | 83 | 76 | 55 | 31 | | | | |
| 29 | 25 | 46 | 41 | 35 | 34 | | | | |
| 29 | 26 | 4 | 4 | 4 | 4 | | | | |
| 29 | 27 | 13 | 13 | 13 | 13 | | | | |
| 29 | 28 | 16 | 16 | 15 | 14 | | | | |
| 29 | 29 | 38 | 38 | 38 | 38 | | | | |
| 29 | 30 | 24 | 23 | 21 | 20 | | | | |
| 29 | 31 | 25 | 24 | 20 | 18 | | | | |
| 29 | 32 | 27 | 27 | 27 | 27 | | | | |
| 30 | 20 | 22 | 22 | 22 | 22 | | | | |
| 30 | 21 | 100 | 83 | 70 | 27 | | | | |
| 30 | 22 | 100 | 80 | 76 | 22 | | | | |
| 30 | 23 | 100 | 100 | 55 | 35 | | | | |
| 30 | 24 | 93 | 79 | 41 | 4 | | | | |
| 30 | 25 | 95 | 79 | 51 | 27 | | | | |
| 30 | 26 | 57 | 48 | 39 | 31 | | | | |
| 30 | 27 | 83 | 80 | 80 | 78 | | | | |
| 30 | 28 | 93 | 92 | 92 | 91 | | | | |
| 30 | 29 | 100 | 100 | 99 | 98 | | | | |
| 30 | 30 | 91 | 90 | 90 | 88 | | | | |
| 30 | 31 | 89 | 86 | 79 | 75 | | | | |
| 30 | 32 | 31 | 31 | 31 | 30 | | | | |
| 30 | 33 | 41 | 25 | 25 | 25 | | | | |
| 31 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 31 | 21 | 4 | 4 | 4 | 4 | | | | |
| 31 | 22 | 65 | 63 | 40 | 35 | | | | |
| 31 | 23 | 96 | 70 | 64 | 43 | | | | |
| 31 | 24 | 70 | 66 | 20 | 20 | | | | |
| 31 | 25 | 81 | 74 | 53 | 52 | | | | |
| 31 | 26 | 100 | 100 | 100 | 94 | | | | |
| 31 | 27 | 100 | 100 | 100 | 94 | | | | |
| 31 | 28 | 100 | 100 | 100 | 96 | | | | |
| 31 | 29 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 31 | 30 | 100 | 100 | 100 | 96 | | | | |
| 31 | 31 | 100 | 100 | 100 | 100 | | | | |
| 31 | 32 | 72 | 62 | 61 | 47 | | | | |
| 31 | 33 | 48 | 40 | 40 | 27 | | | | |
| 31 | 34 | 5 | 5 | 5 | 5 | | | | |
| 32 | 22 | 4 | 4 | 4 | 4 | | | | |
| 32 | 23 | 63 | 58 | 30 | 19 | | | | |
| 32 | 24 | 76 | 74 | 72 | 60 | | | | |
| 32 | 25 | 100 | 100 | 96 | 95 | | | | |
| 32 | 26 | 100 | 100 | 70 | 70 | | | | |
| 32 | 27 | 100 | 100 | 13 | 13 | | | | |
| 32 | 28 | 100 | 100 | 6 | 6 | | | | |
| 32 | 29 | 100 | 100 | 68 | 68 | | | | |
| 32 | 30 | 100 | 100 | 93 | 93 | | | | |
| 32 | 31 | 97 | 96 | 94 | 95 | | | | |
| 32 | 32 | 25 | 25 | 16 | 16 | | | | |
| 32 | 33 | 9 | 7 | 6 | 5 | | | | |
| 32 | 34 | 26 | 26 | 18 | 15 | | | | |
| 33 | 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 33 | 24 | 40 | 40 | 38 | 36 | | | | |
| 33 | 25 | 36 | 36 | 35 | 35 | | | | |
| 33 | 30 | 6 | 6 | 6 | 6 | | | | |
| 33 | 31 | 84 | 84 | 66 | 44 | | | | |
| 33 | 32 | 15 | 15 | 0 | 0 | | | | |
| 33 | 33 | 6 | 6 | 0 | 0 | | | | |
| 33 | 34 | 25 | 25 | 25 | 24 | | | | |
| 34 | 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 34 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |
| 34 | 34 | 18 | 18 | 18 | 18 | | | | |
| 34 | 35 | 4 | 4 | 4 | 4 | | | | |
| 35 | 34 | 30 | 22 | 19 | 15 | | | | |
| 35 | 35 | 2 | 2 | 2 | 2 | | | | |
| 36 | 34 | 23 | 18 | 13 | 11 | | | | |
| 36 | 35 | 18 | 17 | 12 | 7 | | | | |
| 37 | 34 | 10 | 7 | 6 | 4 | | | | |
| 37 | 35 | 16 | 14 | 10 | 7 | | | | |

Para una mejor visualización de los resultados obtenidos de porcentaje de vegetación de cada cuadro, se muestran las siguientes figuras de cada uno de los años analizados.

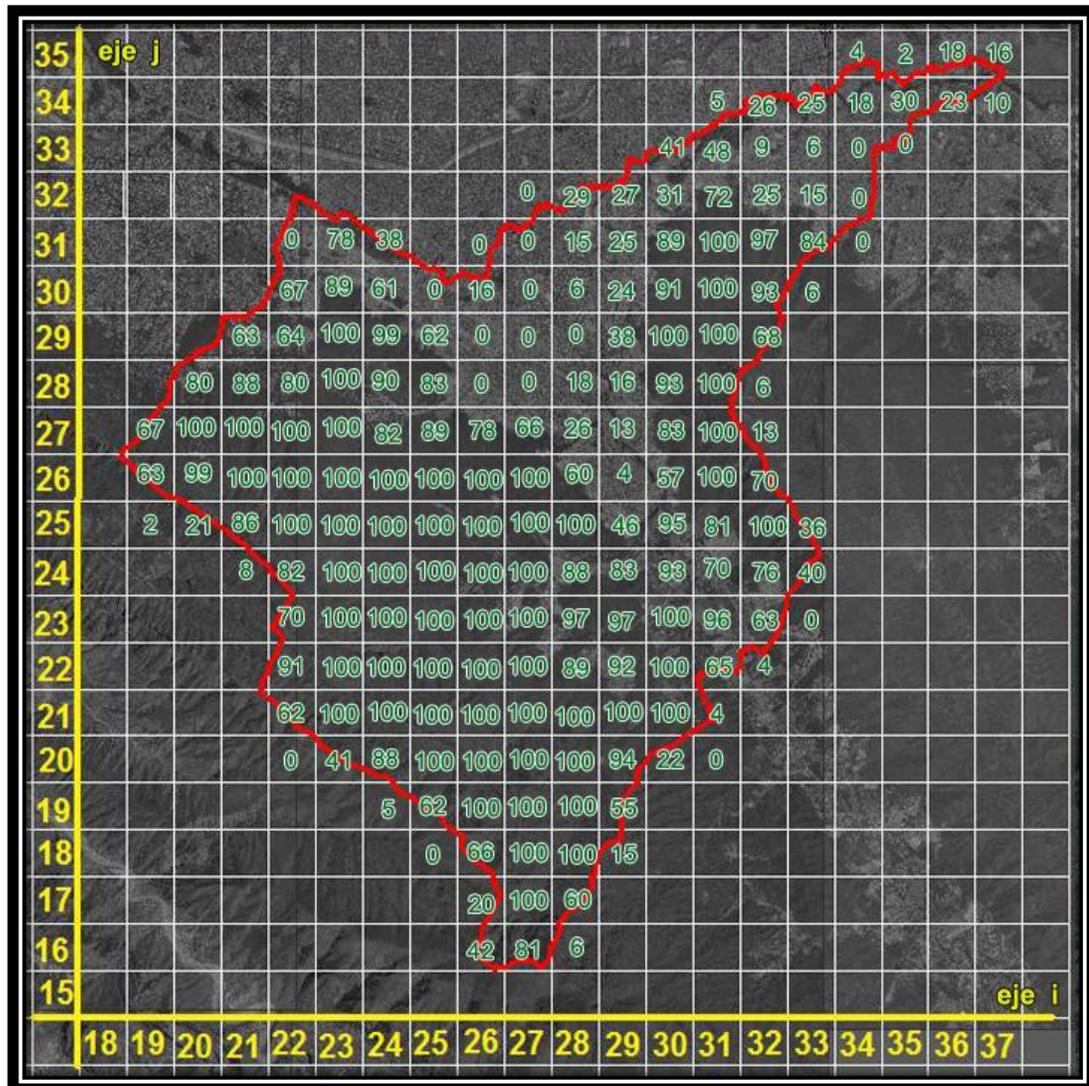


Figura 31. Cuenca del río La Silla, discretizada por una malla de 1km cuadrado por cuadro, y su valor en porcentaje de vegetación en el año 1995.

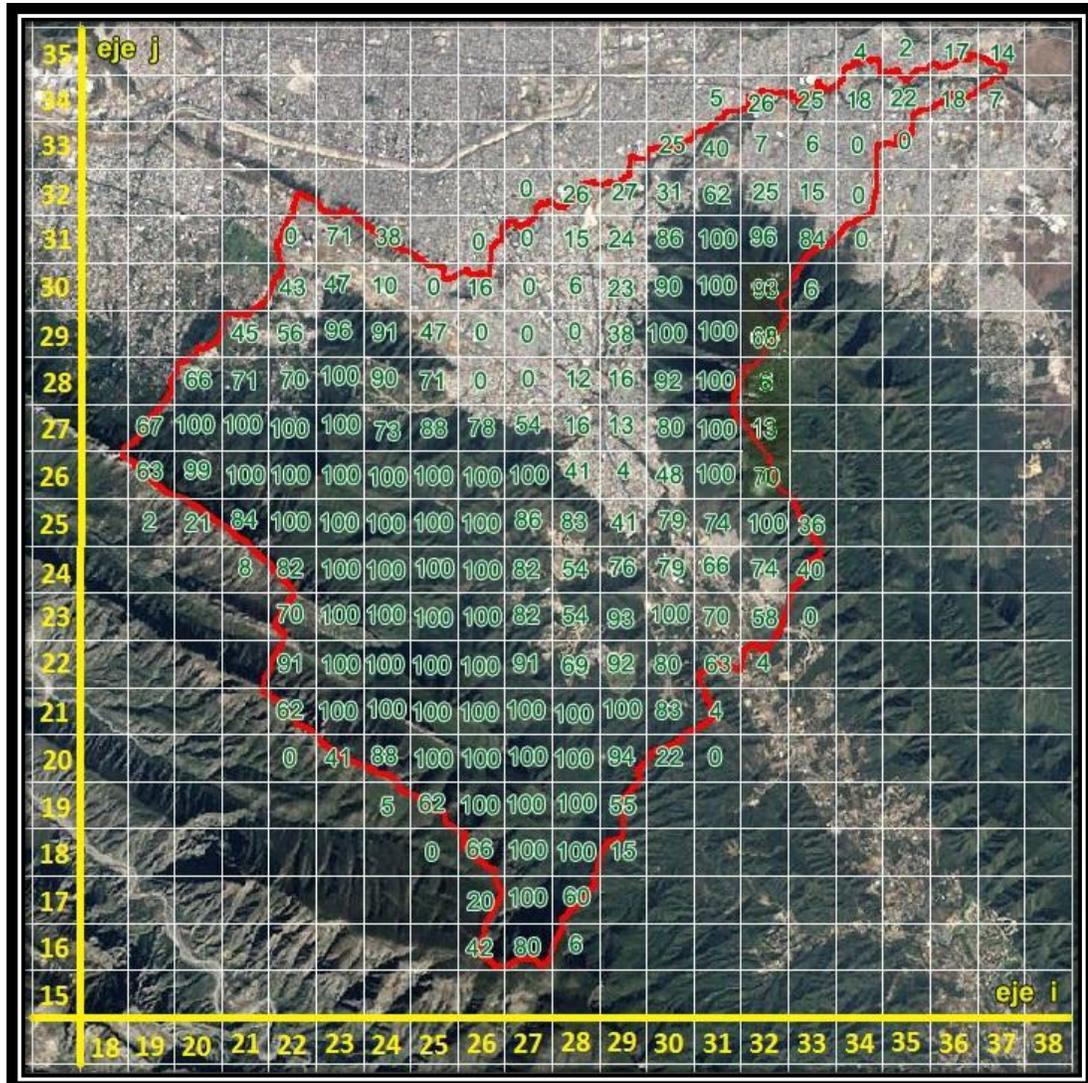


Figura 32. Cuenca del río La Silla, discretizada por una malla de 1km cuadrado por cuadro, y su valor en porcentaje de vegetación en el año 1999.

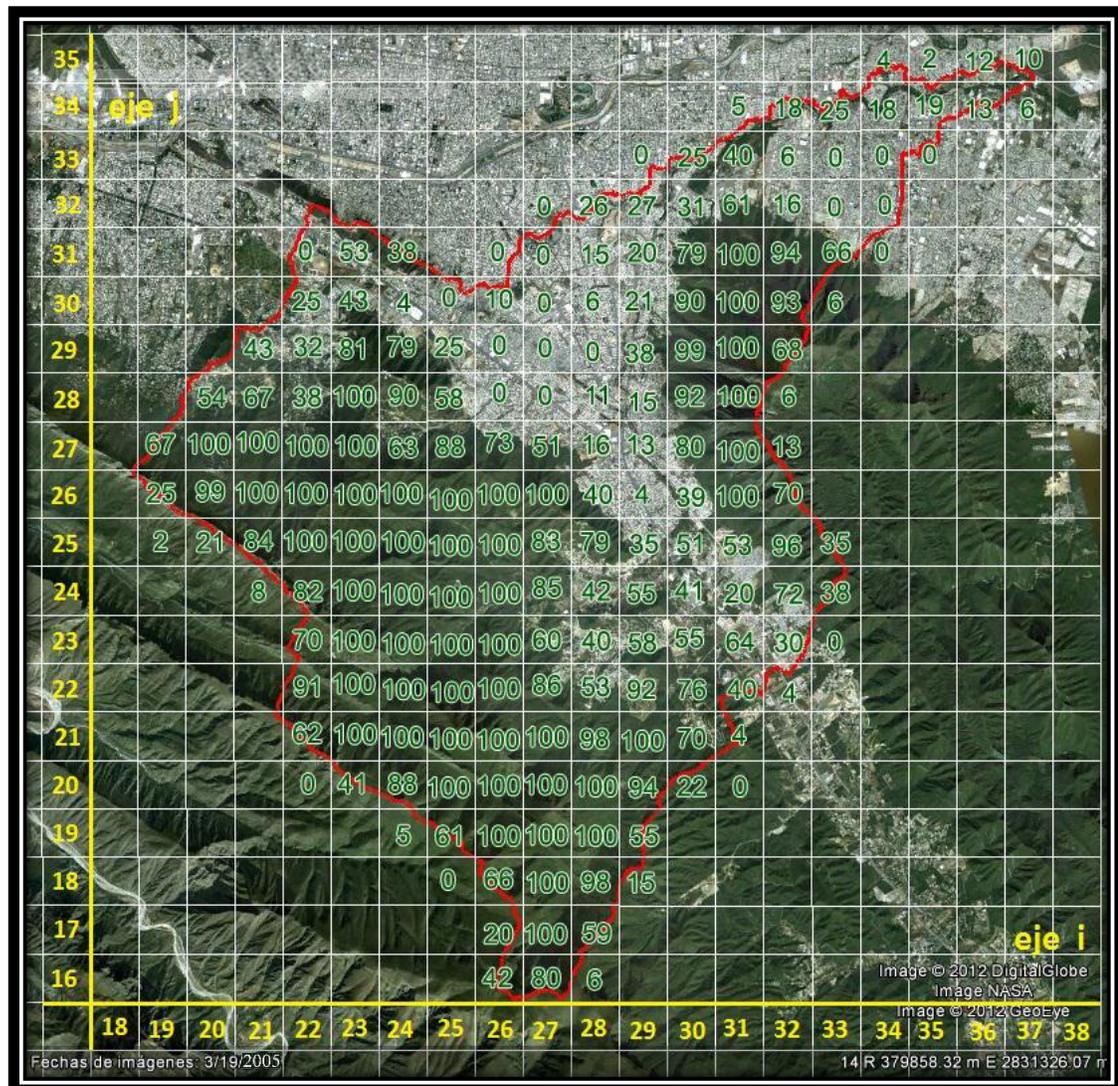


Figura 33. Cuenca del río La Silla, discretizada por una malla de 1km cuadrado por cuadro, y su valor en porcentaje de vegetación en el año 2005.

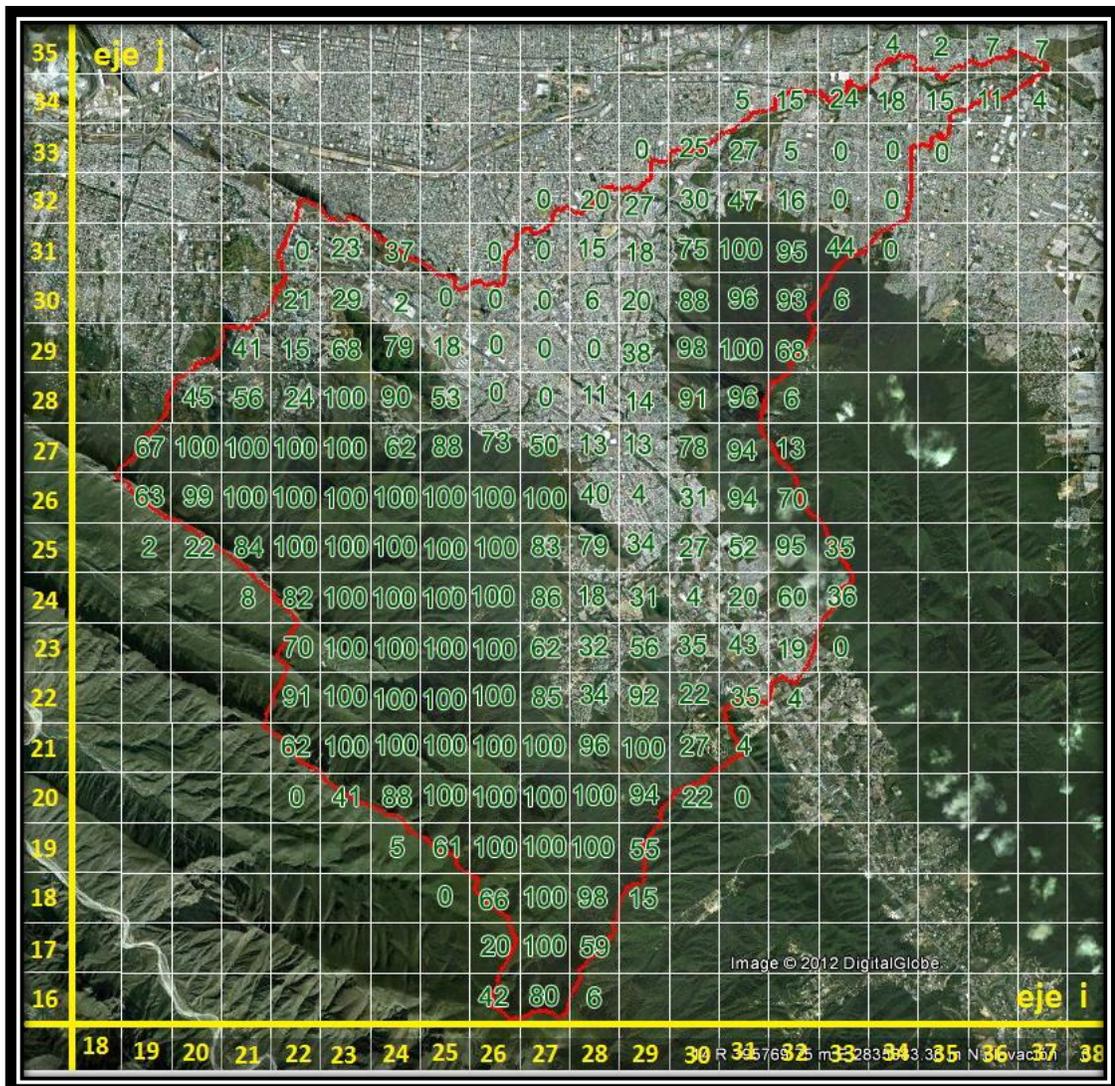


Figura 34. Cuenca del río La Silla, discretizada por una malla de 1km cuadrado por cuadro, y su valor en porcentaje de vegetación en el año 2009.

En 1995, el área que ocupaba la zona urbana era de 36 km², con respecto a 154.41 km² de área total de la cuenca, lo que representa un valor de 23% de zona impermeable. Así mismo, en el año de 1999 la zona urbana se incremento de 23% en 1995, a 27% del área total de la cuenca. En el año 2005, el área de vegetación siguió disminuyendo con

respecto a la zona urbana, la cual alcanzó un 32% del total de la cuenca, siguiendo una tendencia de incremento desde el año 1995. Finalmente, en el año 2009, la zona urbana ocupa un 36% del total de la cuenca. Estos resultados muestran el incremento de la zona urbana en un 13% en el periodo de 1995 a 2009 dentro de la cuenca del río La Silla, la cual pertenece a la Zona Metropolitana de Monterrey, N. L.

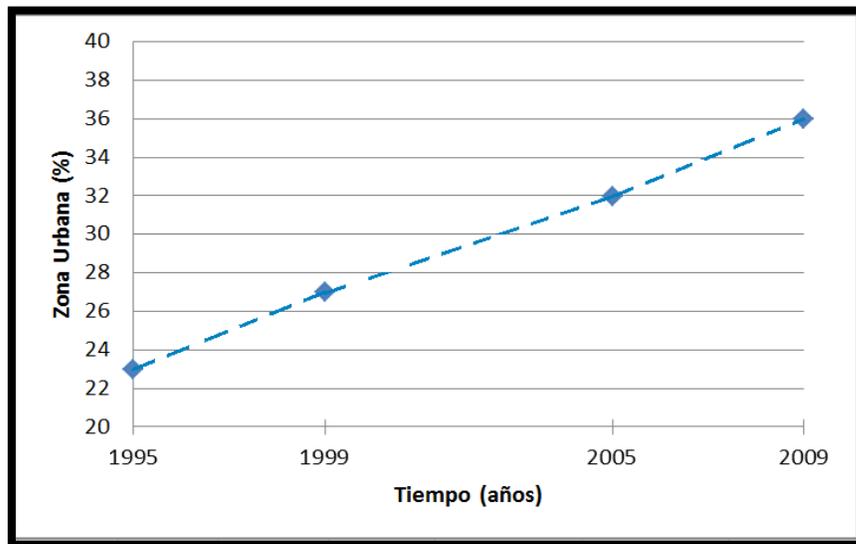


Figura 35. Incremento de la zona urbana de la cuenca del río La Silla a través del periodo analizado.

4.5. Simulación de cobertura de vegetación en el modelo hidrológico CEQUEau.

Los resultados obtenidos con los porcentajes de vegetación del año 1995 cargados en el modelo, para los periodos de simulación de los años 1995, 1999, 2005 y 2009 son:

Tabla 5. Resultados de simulación en base a la vegetación del año 1995.

| | Periodo de simulación | Q medio (m ³ /s) | Lámina (mm.) | Q pico (m ³ /s) | Vol. Anual m ³ | Vol. Anual (hm) |
|------------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|
| VEGETACIÓN 1995 | 1995 | 1.7706 | 361.66 | 77.718 | 55843921 | 55.84 |
| | 1999 | 1.3761 | 281.08 | 35.427 | 43401563 | 43.40 |
| | 2005 | 2.4589 | 502.25 | 138.617 | 77552423 | 77.55 |
| | 2009 | 2.2211 | 453.68 | 26.327 | 70052729 | 70.05 |

* hm = hectómetros = millones de m3

De igual modo, se obtuvieron los resultados para los mismos periodos de simulación con la vegetación del año 1999.

Tabla 6. Resultados de simulación en base a la vegetación del año 1999.

| | Periodo de simulación | Q medio (m ³ /s) | Lámina (mm) | Q pico (m ³ /s) | Vol. Anual m ³ | Vol. Anual (hm) |
|------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|
| VEGETACIÓN 1999 | 1995 | 1.7842 | 364.45 | 81.29 | 56274725 | 56.27 |
| | 1999 | 1.391 | 284.12 | 38.046 | 43870969 | 43.87 |
| | 2005 | 2.4703 | 504.59 | 139.96 | 77913742 | 77.91 |
| | 2009 | 2.2342 | 456.37 | 28.15 | 70468092 | 70.47 |

* hm = hectómetros = millones de m3

Así mismo, la tabla 7 contiene los valores obtenidos a partir de los porcentajes de vegetación del año 2005, y los periodos de simulación.

Tabla 7. Resultados de simulación en base a la vegetación del año 2005.

| | Periodo de simulación | Q medio (m ³ /s) | Lámina (mm) | Q pico (m ³ /s) | Vol. Anual m ³ | Vol. Anual (hm) |
|------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|
| VEGETACIÓN 2005 | 1995 | 1.8025 | 368.18 | 86.3 | 56850674 | 56.85 |
| | 1999 | 1.4118 | 288.37 | 41.32 | 44527212 | 44.53 |
| | 2005 | 2.4856 | 507.72 | 142.217 | 78397045 | 78.40 |
| | 2009 | 2.2519 | 459.99 | 30.525 | 71027056 | 71.03 |

* hm = hectómetros = millones de m3

Finalmente, con la vegetación obtenida del 2009 modelada en cada periodo de simulación, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 8. Resultados de simulación en base a la vegetación del año 2009.

| | Periodo de simulación | Q medio (m ³ /s) | Lámina (mm) | Q pico (m ³ /s) | Vol. Anual m ³ | Vol. Anual (hm) |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|
| VEGETACIÓN 2009 | 1995 | 1.8175 | 371.25 | 90.558 | 57324713 | 57.32 |
| | 1999 | 1.4295 | 291.99 | 43.93 | 45086176 | 45.09 |
| | 2005 | 2.4982 | 510.28 | 144.44 | 78792335 | 78.79 |
| | 2009 | 2.2666 | 462.97 | 32.424 | 71487198 | 71.49 |

* hm = hectómetros = millones de m³

Estos resultados obtenidos se ordenaron en base a escenarios, es decir, para el periodo de simulación de 1995 se tienen los resultados de las diferentes coberturas vegetales de los años 1995, 1999, 2005 y 2009, tal como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 9. Años de simulación y sus diferentes escenarios de cobertura vegetal.

| Año de simulación | Escenarios de cobertura vegetal | Volumen anual (millones de m ³ , hm) | Q medio (m ³ /s) | Q pico (m ³ /s) | Lámina (mm.) |
|-------------------|---------------------------------|---|-----------------------------|----------------------------|--------------|
| 1995 | 1995 | 55.84 | 1.7706 | 77.718 | 361.66 |
| | 1999 | 56.27 | 1.7842 | 81.29 | 364.45 |
| | 2005 | 56.85 | 1.8025 | 86.3 | 368.18 |
| | 2009 | 57.32 | 1.8175 | 90.558 | 371.25 |
| 1999 | 1995 | 43.4 | 1.3761 | 35.427 | 281.08 |
| | 1999 | 43.87 | 1.391 | 38.046 | 284.12 |
| | 2005 | 44.53 | 1.4118 | 41.32 | 288.37 |
| | 2009 | 45.09 | 1.4295 | 43.93 | 291.99 |
| 2005 | 1995 | 77.55 | 2.4589 | 138.617 | 502.25 |
| | 1999 | 77.91 | 2.4703 | 139.96 | 504.59 |
| | 2005 | 78.40 | 2.4856 | 142.217 | 507.72 |
| | 2009 | 78.79 | 2.4982 | 144.44 | 510.28 |
| 2009 | 1995 | 70.05 | 2.2211 | 26.327 | 453.68 |
| | 1999 | 70.47 | 2.2342 | 28.15 | 456.37 |
| | 2005 | 71.03 | 2.2519 | 30.525 | 459.99 |
| | 2009 | 71.49 | 2.2666 | 32.424 | 462.97 |

Gráficamente se presentan los valores de los escenarios de vegetación en el eje de las abscisas, y los volúmenes anuales en el eje de las ordenadas de cada uno de los periodos de simulación. De igual manera, se realizaron los gráficos que involucran los escenarios de vegetación y los caudales pico de cada periodo de simulación.

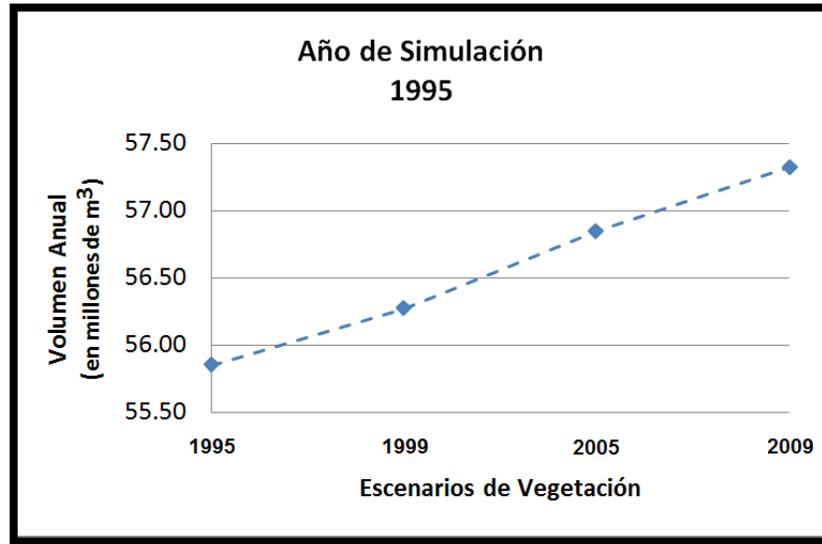


Figura 36. Escenarios de vegetación, y su relación con el volumen anual del año 1995.

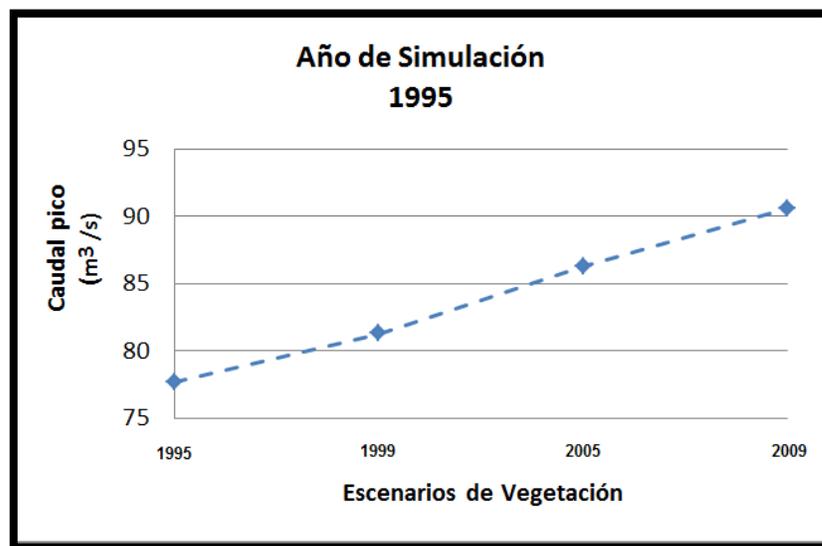


Figura 37. Escenarios de vegetación, y su relación con el caudal pico del año 1995.

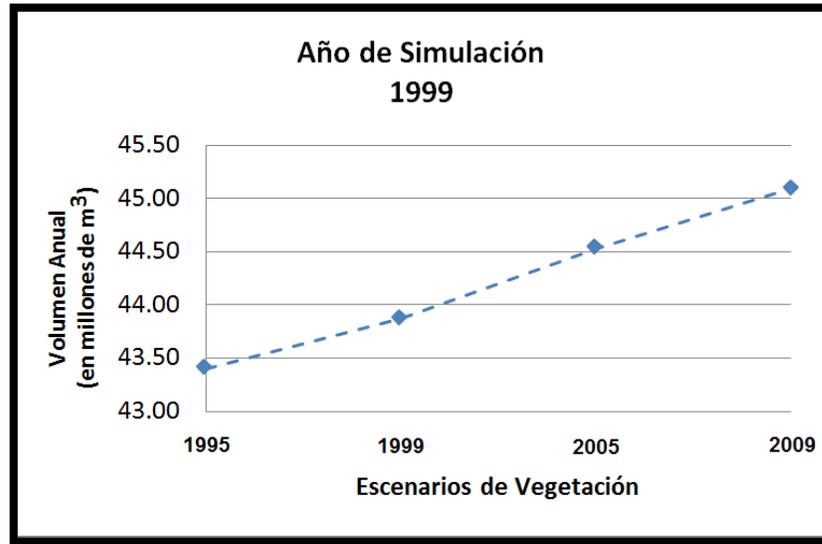


Figura 38. Escenarios de vegetación, y su relación con el volumen anual del año 1999.

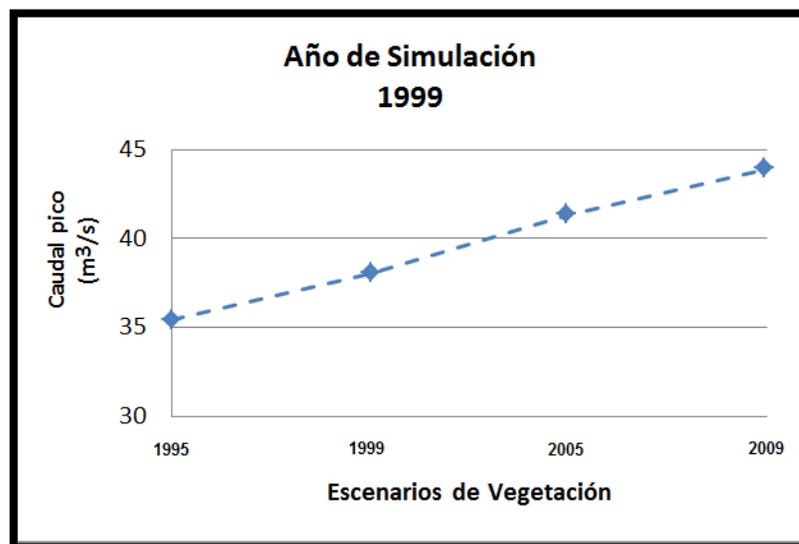


Figura 39. Escenarios de vegetación, y su relación con el caudal pico del año 1999.

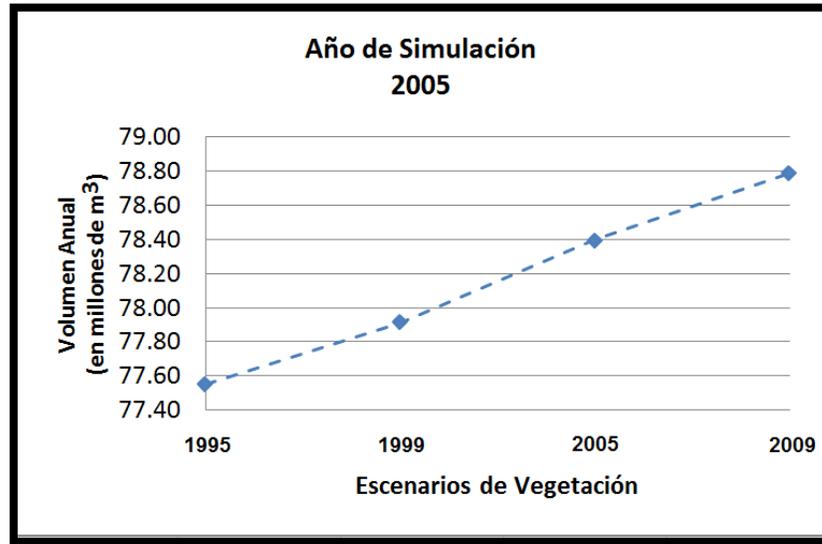


Figura 40. Escenarios de vegetación, y su relación con el volumen anual del año 2005.

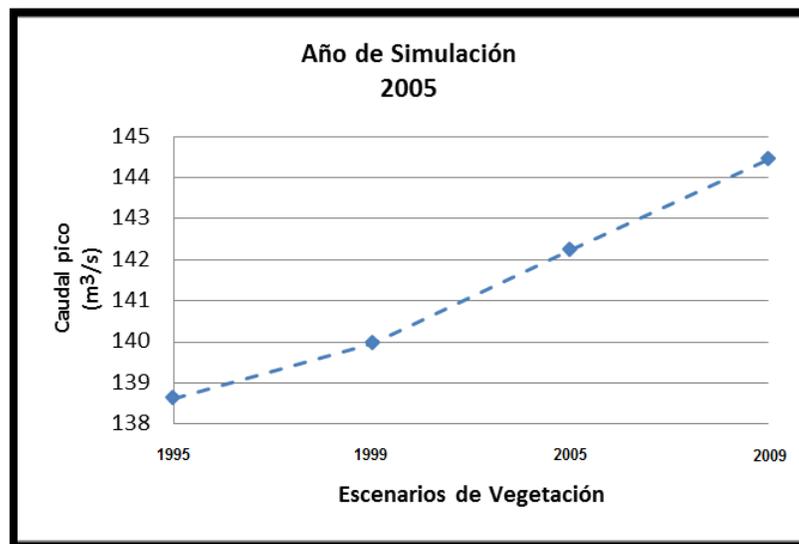


Figura 41. Escenarios de vegetación, y su relación con el caudal pico del año 2005.

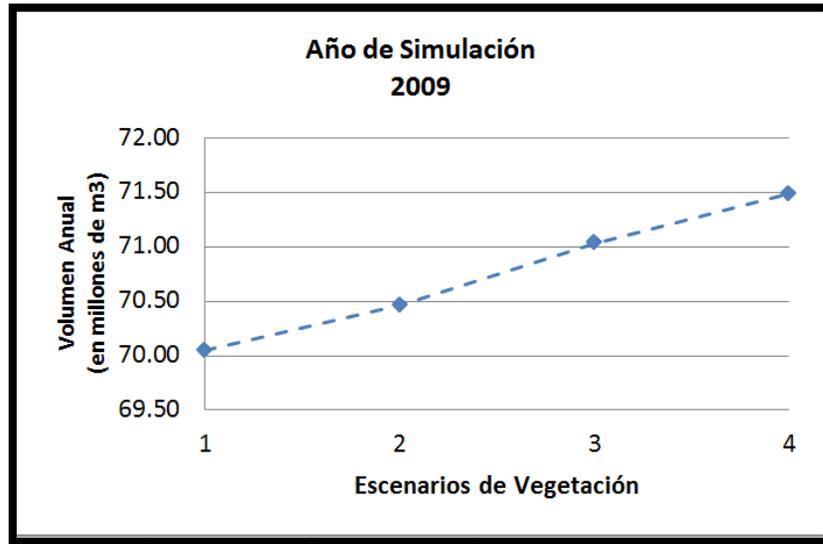


Figura 42. Escenarios de vegetación, y su relación con el volumen anual del año 2009.

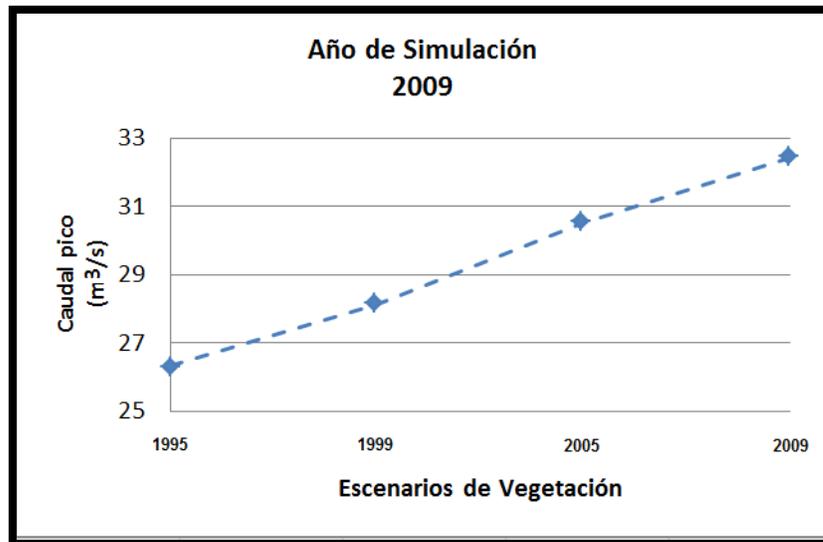


Figura 43. Escenarios de vegetación, y su relación con el caudal pico del año 2009.

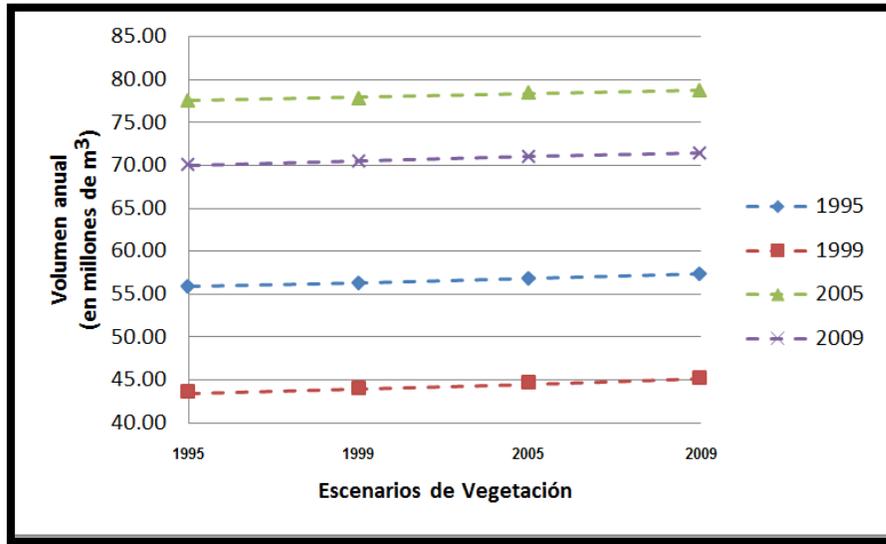


Figura 44. Comparativa de los escenarios de vegetación y los volúmenes de escurrimiento, bajo diferentes periodos de simulación.

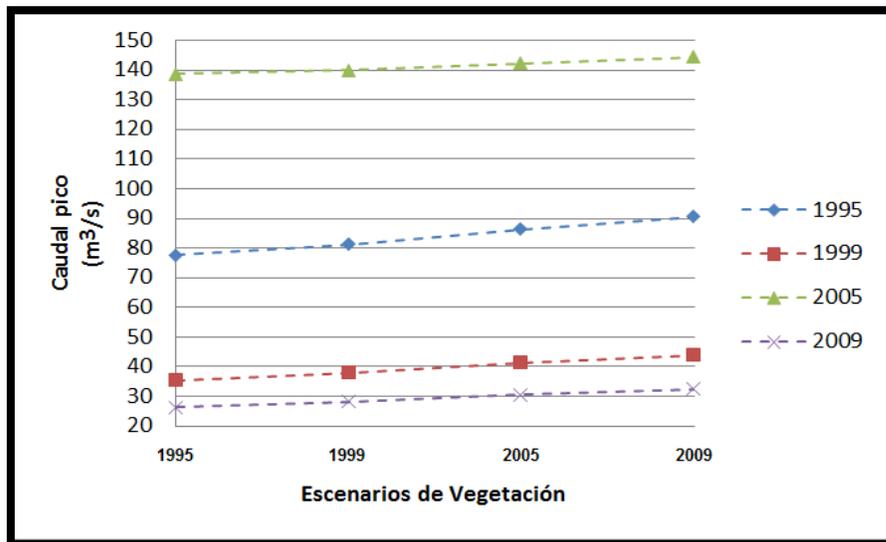


Figura 45. Comparativa de los escenarios de vegetación y los caudales pico, bajo diferentes periodos de simulación.

4.6. Simulación de cobertura de vegetación en escenarios futuros.

4.6.1. Año 2020.

Con los diferentes escenarios de vegetación de los años 1995, 1999, 2005 y 2009, se realizó una gráfica para mostrar el incremento en porcentaje de la zona urbana a través del tiempo (figura 35). A partir de estos datos, se trazó una línea recta dentro de la misma gráfica para extrapolar el valor del porcentaje de urbanización estimado para el año 2020, como escenario futuro (figura 46).

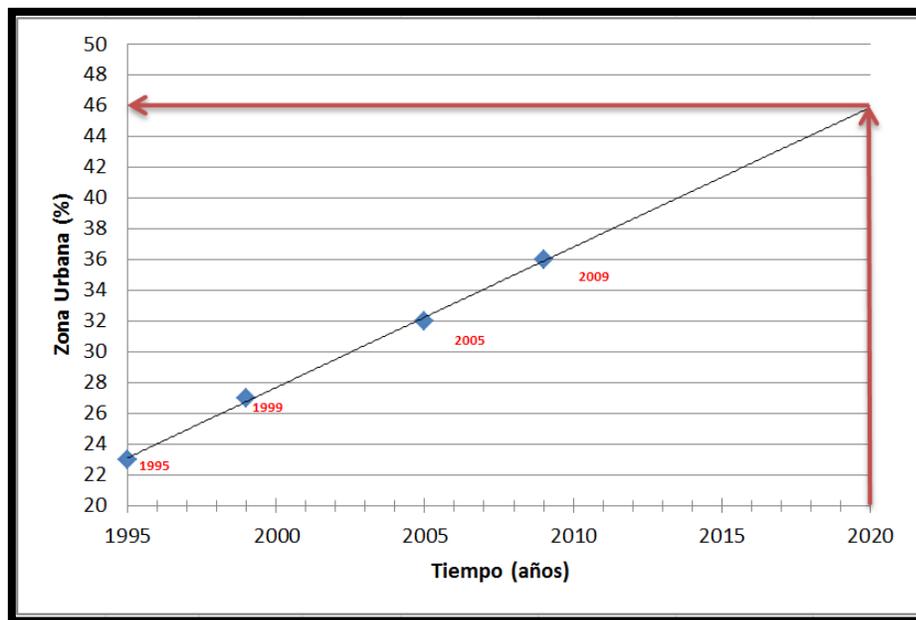


Figura 46. Proyección de porcentaje de urbanización para el año 2020.

De acuerdo a la figura anterior, se estima que para el año 2020 la cuenca del río La Silla cuenta con aproximadamente un 46% de urbanización, y por lo tanto, 54% de cobertura vegetal. De esta manera, se realizó la simulación de cobertura vegetal en el modelo hidrológico, respetando el valor de 54% sin urbanización dentro de la cuenca. Así que, se

ajustaron los valores de porcentaje de vegetación en cada cuadro hasta que al final el área urbana sea de 46% aproximadamente, como lo muestra la siguiente figura.

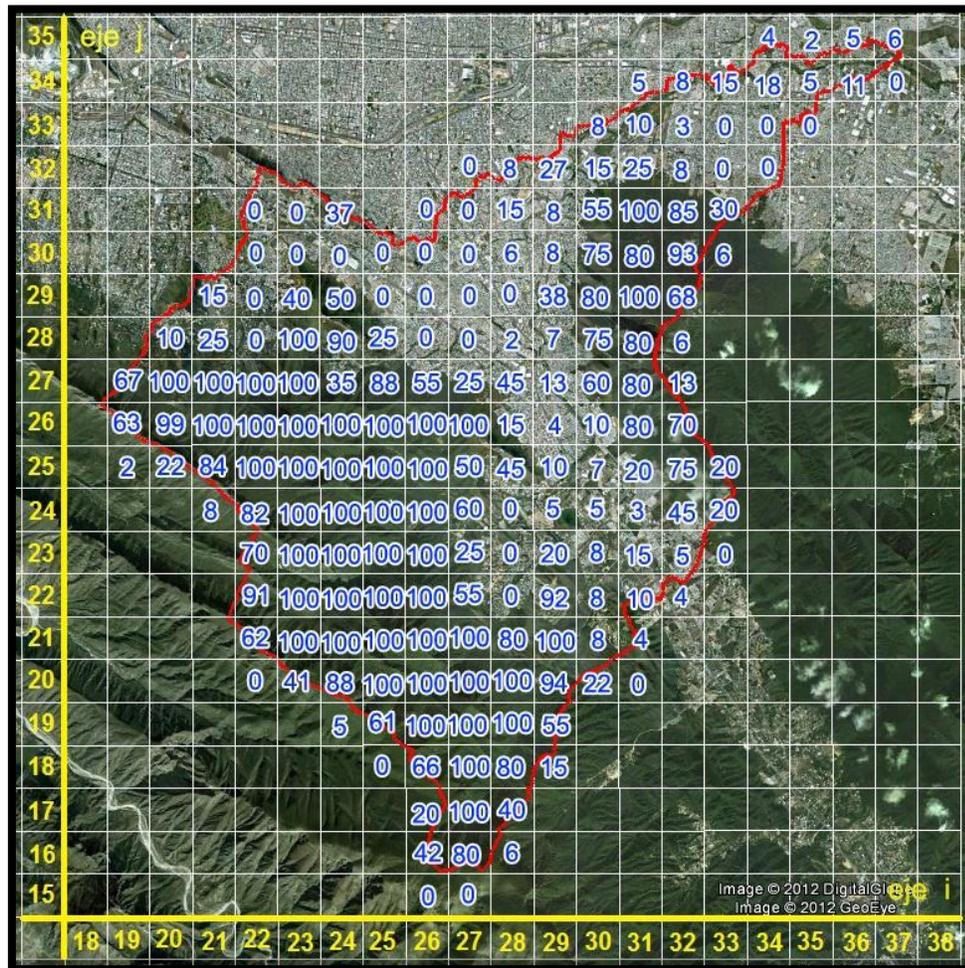


Figura 47. Cuenca del río La Silla, discretizada por una malla de 1km cuadrado por cuadro, y su valor en porcentaje de vegetación estimado para el año 2020.

La simulación para el año 2020 se realizó con los porcentajes de vegetación esperados para ese año y en base a las lluvias presentadas en los años 1995, 1999, 2005 (ocurrencia del Huracán Emily), y 2009. Los resultados obtenidos se describen en la tabla siguiente:

Tabla 10. Resultados obtenidos de distintos periodos de simulación con el escenario de vegetación 2020.

| | Año de simulación | Q medio (m3/s) | Lámina (mm) | Q pico (m3/s) | Vol. Anual m3 | Vol. Anual (hm) |
|------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| | 1995 | 1.8604 | 380.01 | 101.989 | 58677344 | 58.68 |
| VEGETACIÓN 2020 | 1999 | 1.4791 | 302.13 | 50.502 | 46651893 | 46.65 |
| | 2005 | 2.5351 | 517.82 | 151.852 | 79956586 | 79.96 |
| | 2009 | 2.3084 | 471.52 | 37.206 | 72807403 | 72.81 |

* hm = hectómetros = millones de m3

4.6.2. Límites del Parque Nacional “Cumbres de Monterrey”.

Éste escenario, catalogado el más crítico, simuló la cobertura vegetal al 100% dentro de los límites del Parque Nacional Cumbres de Monterrey y, fuera de este límite, consideró la zona como urbanizada, esto es, 0% de cobertura vegetal. Los resultados del trazo del límite del Parque Nacional Cumbres de Monterrey en el software AutoCAD Civil 3D 2010 se muestran en la figura 48. Después de realizado el paso anterior, la polilínea se exporto utilizando la herramienta Publish to Earth, visualizando los resultados obtenidos en Google Earth, como lo muestra la figura 49.

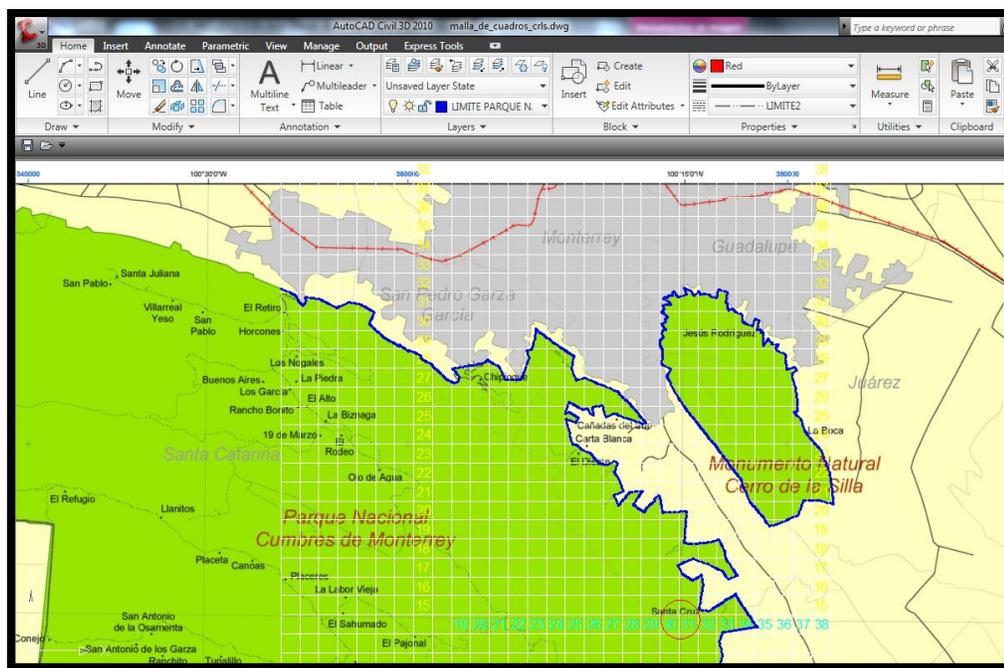


Figura 48. Carta editada por CONANP e INEGI a escala 1:150,000 (metros) y el trazo (línea azul) de la delimitación del Parque Nacional Cumbres de Monterrey dentro de la zona en estudio.

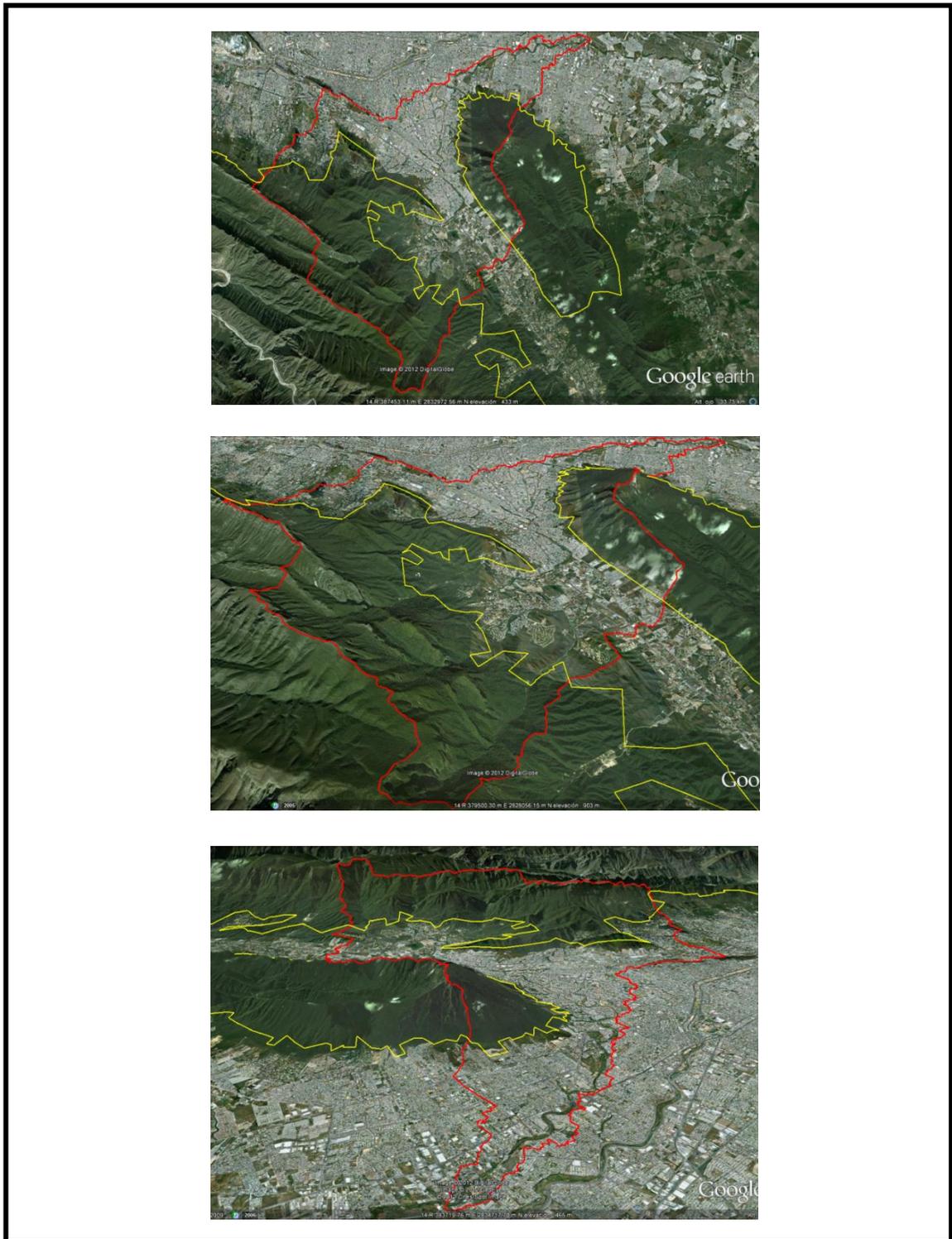


Figura 49. Polilínea georreferenciada (línea amarilla) exportada de AutoCAD Civil 3D 2010 a Google Earth, la cual indica los límites del Parque Nacional Cumbres de Monterrey, dentro de la cuenca del río La Silla (línea roja).

De esta manera, los resultados de los porcentajes de cada cuadro que discretiza a la cuenca del río la Silla, se muestran en la figura siguiente, teniendo un 52% de urbanización dentro de la cuenca.

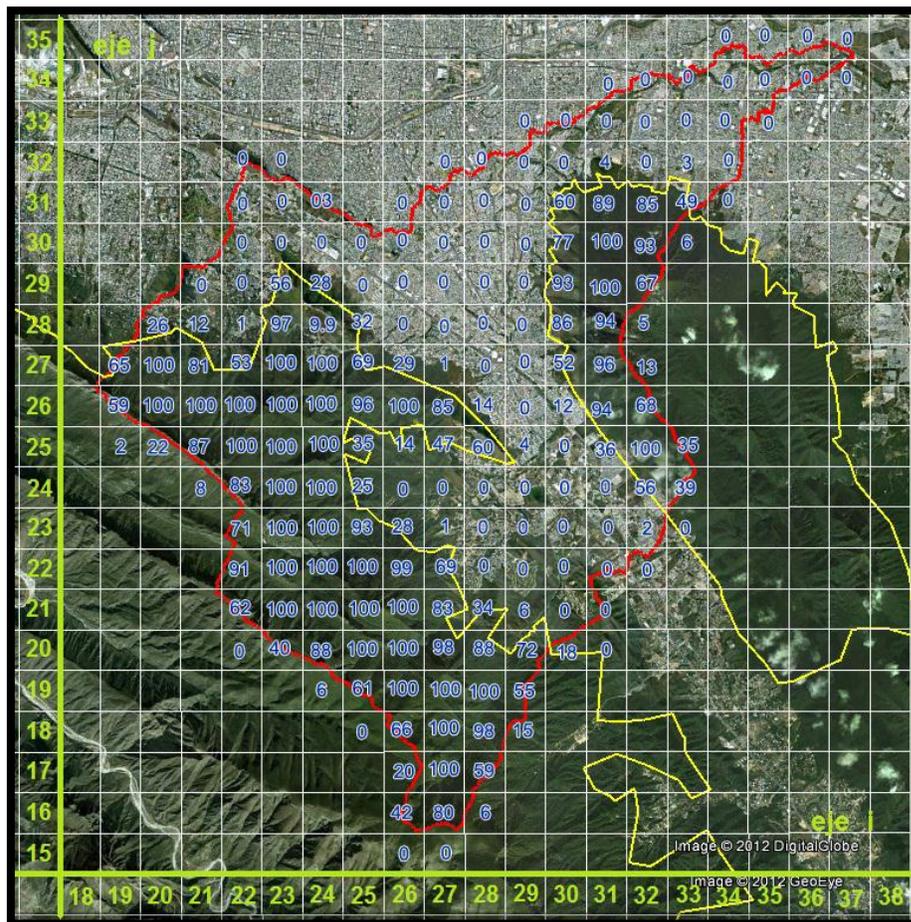


Figura 50. Cuenca del río La Silla, discretizada por una malla de 1km cuadrado por cuadro, y su valor en porcentaje de vegetación, de acuerdo al límite del Parque Nacional Cumbres de Monterrey (línea amarilla).

La simulación hidrológica se realizó de acuerdo a los porcentajes de vegetación en el límite del Parque Nacional Cumbres de Monterrey, y en base a las lluvias presentadas en

el año 1995, 1999, 2005 (ocurrencia del Huracán Emily) y 2009. Los resultados obtenidos se describen en la tabla siguiente:

Tabla 11. Resultados obtenidos de distintos periodos de simulación con el escenario de vegetación del Parque Nacional Cumbres de Monterrey.

| | Año de simulación | Q medio (m3/s) | Lámina (mm) | Q pico (m3/s) | Vol. Anual m3 | Vol. Anual (hm) |
|------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| | 1995 | 1.8895 | 385.96 | 109.244 | 59596084 | 59.60 |
| VEGETACIÓN PNCM | 1999 | 1.5118 | 308.79 | 54.458 | 47680264 | 47.68 |
| | 2005 | 2.5602 | 522.95 | 157.525 | 80748710 | 80.75 |
| | 2009 | 2.3362 | 477.2 | 40.101 | 73684452 | 73.68 |

* hm = hectómetros = millones de m3

De esta manera, los resultados de los volúmenes anuales escurridos y caudales pico de cada periodo de simulación (1995, 1999, 2005, 2009), y su relación con los distintos escenarios de vegetación (1995, 1999, 2005, 2009, 2020 y PNCM), son presentados en las figuras 51 y 52, respectivamente, las cuales también indican el porcentaje de incremento del volumen anual escurrido y caudal pico de cada escenario de vegetación, con respecto al valor del escenario 1995 (volumen anual escurrido y caudal pico inicial).

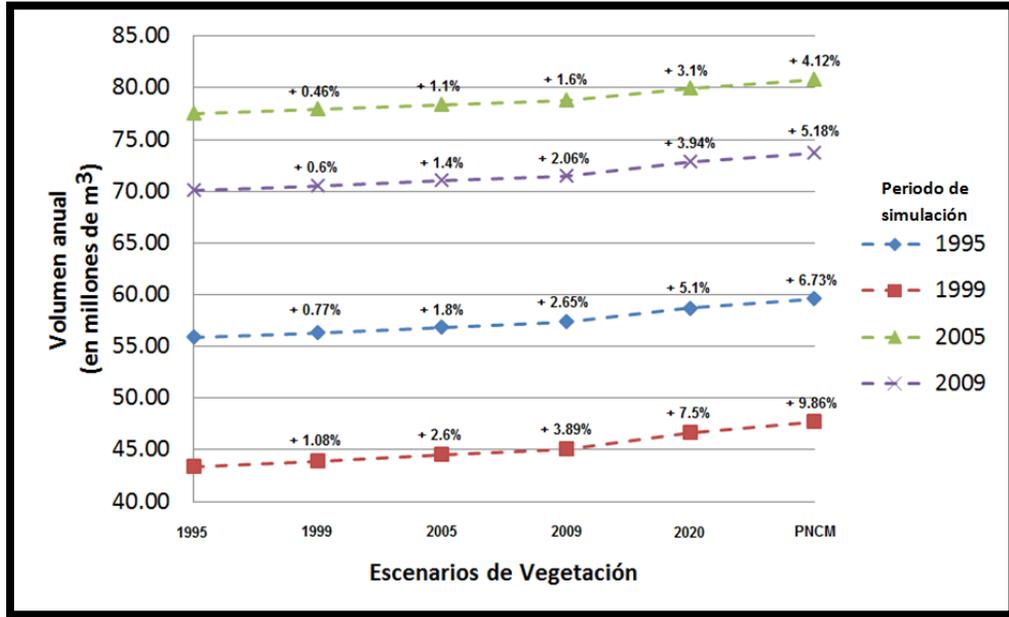


Figura 51. Comparativa de los escenarios de vegetación y los volúmenes de escurrimiento, bajo diferentes periodos de simulación.

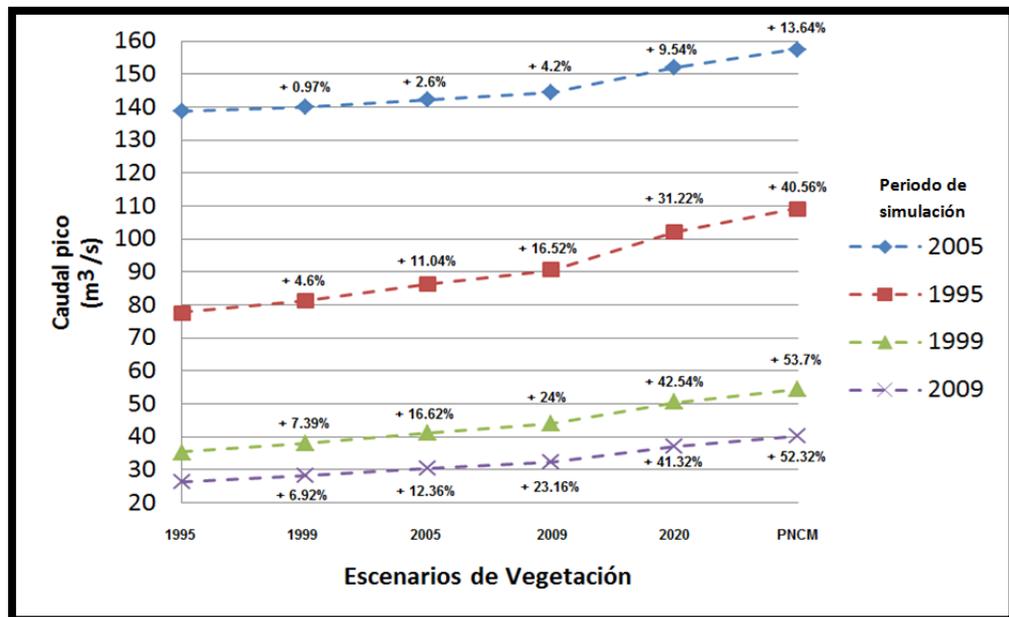


Figura 52. Comparativa de los escenarios de vegetación y el caudal pico, bajo diferentes periodos de simulación.

Los resultados obtenidos muestran un incremento tanto en el volumen anual escurrido y en el caudal pico, con respecto a la disminución de la cobertura vegetal a través del tiempo. En efecto, en 1995 hubo una cobertura vegetal del 77%, la cual fue disminuyendo al paso de los años, llegando a valores de 73%, 68%, 64%, 54% y 48% para los años 1999, 2005, 2009, el escenario futuro 2020, y el escenario futuro-crítico del Parque Nacional Cumbres de Monterrey (PNCM), respectivamente.

Debido a esto, en las lluvias presentadas en el año 1995, se obtuvo un volumen de escurrimiento de 55.84 millones de m^3 con un escenario de vegetación del año 1995, aumentándose a 59.60 millones de m^3 si el escenario de cobertura vegetal llegara al punto crítico del límite del PNCM, lo cual representa un incremento de 6.73%. De igual manera, para las lluvias presentadas en el año 1995, el caudal pico fue de 77.72 m^3/s con un escenario de cobertura vegetal igual al año 1995, elevándose a 109.24 m^3/s para un incremento de la zona urbana hasta los límites del PNCM, lo cual representa un crecimiento del caudal pico de 40.56%.

Así mismo, para las lluvias presentadas en el 2005, año de ocurrencia del huracán Emily y que provocó inundaciones severas en la zona de estudio, se realizaron simulaciones con diferentes escenarios de vegetación. Por ejemplo, con un escenario de cobertura vegetal del año 1995, se obtuvo un volumen de escurrimiento de 77.55 millones de m^3 , el cual alcanzó un valor de 80.75 millones de m^3 con un escenario de urbanización crítico que alcance el límite del PNCM, representando un incremento de 4.12%. De igual modo, el caudal pico se elevó de 138.62 m^3/s a 157.53 m^3/s , con escenarios de vegetación del año 1995 y el escenario PNCM, respectivamente, lo que representa un 13.64% de incremento.

Los valores mas altos de volumen anual escurrido y caudal pico registrados en las simulaciones bajo diferentes escenarios de vegetación, fueron obtenidos del periodo de simulación 2005, año del paso del huracán Emily por la ciudad de Monterrey, aunque la diferencia de incremento entre los distintos escenarios de vegetación se mantuvo normal en relación con los demás periodos de simulación, puesto que sólo aumento la cantidad de precipitación debido al huracán.

Estos resultados concuerdan con la investigación realizada por Ruberto y otros (2006), en donde determinaron la variabilidad del escurrimiento superficial y su impacto hidrológico cuando existen modificaciones en las superficies impermeables en la cuenca urbana Cisterna, en Resistencia, Argentina, llevando a cabo el análisis en 2 escenarios de cobertura vegetal (1995 y 2006), y realizando el análisis en el modelo ArHymo, con el que se calcularon los hidrogramas de escurrimiento directo. Obtuvieron un incremento del 15.27% en el caudal pico, y 21.05% en el volumen de escurrimiento, debido al aumento del 24.12% en las áreas impermeables.

5. Conclusiones y recomendaciones

Se llevó a cabo la evaluación del impacto del escurrimiento generado por eventos de precipitación extremos aplicando el modelo hidrológico de parámetros distribuidos CEQUeau hasta la estación hidrométrica Los Lermas en la cuenca del río La Silla, tomando en cuenta el cambio y uso del suelo.

Se obtuvo la base de datos de las estaciones hidrometeorológicas seleccionadas, contando con información aceptable para poder llevar a cabo la investigación.

El uso de los Sistemas de Información Geográfica, en particular el SIG Idrisi Andes, ayudó a obtener y manipular con éxito la información en formato digital necesaria, como por ejemplo el Modelo Digital de Elevación en formato raster, la capa vectorial de las estaciones hidrometeorológicas, así como la capa raster de la ocupación del suelo.

Se generaron las bases de geodatos, así como la aplicación del módulo hidrogeomático SIG Idrisi-CEQUeau que permitió la extracción de la información requerida por el

modelo hidrológico en forma precisa, ahorrando tiempo y reduciendo al máximo el error humano.

Se logró preparar, calibrar y validar el modelo hidrológico CEQUeau hasta la estación hidrométrica Los Lermas, concluyéndose que los valores obtenidos son aceptables para que se pueda realizar la modelación hidrológica en CEQUeau.

Se analizó la información de ocupación de suelo por medio de imágenes satelitales, obteniendo exitosamente los distintos porcentajes de cobertura vegetal de los años estudiados (1995, 1999, 2005, 2009, 2020 y PNCM).

Se compararon los resultados obtenidos y se concluyó que el aumento de la impermeabilización de la cuenca del río La Silla, asociada al proceso de urbanización, muestra una relación directa con el aumento del caudal pico, dejando evidencia de que no existe amortiguamiento.

Los resultados obtenidos en la investigación son de gran utilidad para conocer la magnitud del impacto de los eventos extremos de precipitación cuando se presentan en la cuenca del río La Silla debido al cambio y uso de suelo, específicamente de zona de vegetación a zona urbana, la cual inevitablemente sigue en constante crecimiento, afectando a la población que se localiza principalmente en los márgenes del cauce del río La Silla, tomando en cuenta también la falta de planeación y el incumplimiento de la ley de los asentamientos irregulares que invaden la zona federal.

Debido a esto, se recomienda realizar una delimitación detallada de la zona federal del cauce principal del río La Silla, con el objetivo de evitar y/o reubicar la invasión por asentamientos humanos, instalaciones eléctricas, agua potable y principalmente del drenaje sanitario, ya que gran parte de los deslaves, socavación localizada en puentes, vados y alcantarillas, así como la destrucción de infraestructura de vialidades, áreas recreativas, casas habitación, etc., han sido consecuencia de la falta de planeación y el permiso por parte de los gobiernos municipales. Así mismo, llevar a cabo estudios constructivos de infraestructura de protección a núcleos de población cercanos al cauce principal, que se han visto afectados por la ocurrencia de estos fenómenos extraordinarios de precipitación, con la finalidad de garantizar la seguridad de los habitantes que residen en esas zonas.

En forma concreta a lo largo del cauce del río La Silla, se recomienda proponer obras estructurales de encauzamiento, tales como la construcción de muros de contención, colocación de gaviones, así como también la evaluación, rehabilitación y/o diseño de taludes, de acuerdo a los resultados obtenidos de recorridos de campo realizados a lo largo del río La Silla. Además, es importante la realización de inspecciones y evaluaciones en campo de puentes vehiculares sobre el río La Silla, con el fin de detectar en forma visual la presencia de fallas o riesgos estructurales en las condiciones actuales, estableciendo acciones de mejora, como por ejemplo: reparaciones leves en la estructura o reparación total, para cada uno de ellos.

Desde el punto de vista de cooperación de la comunidad, es importante crear conciencia del respeto a la naturaleza, pues gran parte de la problemática asociada a inundaciones en

esas zonas cercanas al río La Silla, es consecuencia de rellenos, basura, escombros e invasiones habitacionales que reducen el área hidráulica en distintos sectores del cauce.

Referencias Bibliográficas

Argüello, G., (1992). *Modelación hidrológica continua en tiempo real de la cuenca del Rio Virilla*. Costa Rica. Tesis Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 127 páginas.

Beguiría, S., Lorente, A., (1999). *Distribución espacial del riesgo de precipitaciones extremas en el pirineo Aragonés occidental*. Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC, Campus de Aula Dei, Zaragoza. Geographicalia, 15 páginas.

Berlanga-Robles, C., Ruiz-Luna, A., Cobarruvias-Legaspi, H., Hernández-Guzmán, R., (2011). *Patrones de escurrimiento en la Cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa, asociados a cambios de uso del suelo: Una aproximación con el método del número de curva*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen 63, Núm. 1. Págs. 39-52.

Bocco, G., J.L. Palacio y C.A. Valenzuela (1991). *Integración de la percepción remota y los sistemas de información geográfica*. Ciencia y Desarrollo XVII (97): 79-88.

B. Tellez and S. Servigne. (1997). *Updating urban database with aerial photographs: A common structuring methodology*. Computers, Environment and Urban Systems. UK. Vol. 21 No. 2, pp. 133-145. 1997.

C. Armenakis, F. Leduc, I. Cyr, F. Savopol and F. Cavayas. (2003). *A comparative analysis of scanned maps and imagery for mapping applications*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. The Netherlands. Vol. 57, pp. 304-314. 2003.

Cervantes – Sánchez, O., (2010). *Valores extremos de lluvia que generan emergencias a la población y daños a la infraestructura del país*. XXI Congreso Nacional de Hidráulica, Guadalajara, Jalisco, México. Octubre del 2010. 6 páginas.

CONABIO., (2005). *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*, <http://www.conabio.gob.mx>. (Consulta realizada en septiembre del 2011).

Del Río, J. (2010). *Introducción al tratamiento de datos espaciales en la hidrología*. Ed. Bubok. Impreso por Bubok Publishing. 162 págs.

Eastman, R. (2004). *Guía para SIG y procesamiento de imágenes*. Idrisi Kilimanjaro. Clark University. Clark Labs. Manual Version 14.00

Estado de Nuevo León., (2010). *Atlas de riesgo para el Estado de Nuevo León, segunda etapa*. Consulta Pública. Octubre del 2010. Secretaría de Desarrollo Sustentable de Nuevo León. 317 páginas.

Foni, A., Seal, D., (2003). *Shuttle Radar Topography Mission: an innovative approach to shuttle orbital control*, Acta Astronáutica, No. 54, PP. 565-570.

Guerra-Cobián, V. H., (2007). *Análisis del efecto de discretización espacial en el modelado de cuencas hidrológicas utilizando el modelo distribuido CEQUEAU-ONU*. Tesis Doctorado CIRA-UAEM. Toluca, Estado de México, Méx.

Henriquez, C., Azócar, G., Aguayo, M., (2006). *Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VII Región del Biobío, Chile*. Revista de Geografía Norte Grande, No. 36. Págs. 61-74.

Hernández-Villarreal, D., Belmonte-Jiménez, S., Ladrón-de Guevara, M., (2010). *Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR_Oaxaca)*. Instituto Politécnico Nacional.

Instituto Nacional de Geografía y Estadística, INEGI. (2012). *Datos de relieve. ¿Qué es un Modelo Digital de Elevación (MDE)?*. www.inegi.org.mx. Consulta realizada en marzo del 2012.

Juárez-Méndez, J., Ibáñez-Castillo, L., Pérez-Nieto, S., Arellano-Monterrosas, J., (2009). *Uso del suelo y su efecto sobre los escurrimientos en la cuenca del Río Huehuetán*. Ingeniería Agrícola y Biosistemas. Volumen 1, Núm. 2. Págs. 69-76.

Lambin, E. F., N. Baulies, G. Bockstael, T. Fisher, R. Krug, E. F. Lemmans, R. R. Moran, Y. Rindfuss, D. Sato, B. L. Skole, Turner II and C. Vogel, (1999). *Land use and land cover change implementation strategy*, IGBP report, 48, IHDP, report 10, Estocolmo.

Magaña-Hernández, F., (2008). *Obtención de caudales en sitios no aforados de la cuenca del Río Tacotalpa utilizando el modelo hidrológico de parámetros distribuidos CEQUEAU-ONU*. Tesis Licenciatura, UJAT. Cunduacán, México.

Magaña-Hernández, F., (2010). *Simulación hidrológica del río escondido utilizando datos de precipitación estimados por radar*. Tesis Maestría, UAEMex. Toluca, México.

Magaña-Rueda, V., (2007). *Elaboración de escenarios de cambio climático para la región de estudio en el Golfo de México*. Instrumentación de Medidas de Adaptación al Cambio Climático en Humedales Costeros del Golfo de México. Informe Final de Trabajo.

Mena-Frau, C., Ormazábal-Rojas, Y, Morales-Hernández, Y, Gajardo-Valenzuela, J., (2008). *Exactitud espacial en la creación de bases de datos SIG modelos ráster y vectorial*. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, junio, año/vol. 16, número 002. Universidad de Tarapacá. Arica, Chile. pp. 159-168.

Miranda-Aragón, L., Ibáñez-Castillo, A., Valdez-Lazalde, R., Hernández-de la Rosa, P., (2009). *Modelación hidrológica empírica del gasto de 100 años de periodo de retorno*

del Río Grande, Tlalchapa, Guerrero en dos escenarios de uso del suelo. Agrociencia. Volumen 43. Núm. 4. Págs. 333-344.

Morin, G., Paquet, P., (1995). *Le Modèle de Simulation de Quantité et de Qualité CEQUeau*, Guide de l'utilisateur. Vers. 2.0 pour Windows. INRSEau, rapport de recherche no. 435, 54 pp.

Nuevo León, (2011). *Gobierno del Estado de Nuevo León*, <http://www.nl.gob.mx>. Consulta realizada en octubre del 2011.

Oñate-Valdivieso, F., (2006). *Aplicación de técnicas de fotointerpretación, modelamiento hidrológico y SIG en un estudio de hidrología urbana en la sierra ecuatoriana.* XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela, Octubre del 2006.

Protección Civil N. L., (2010). *Plan de contingencias temporada de ciclones tropicales 2010.* Gobierno del Estado de Nuevo León. Secretaría General de Gobierno, 55 páginas.

Rosete, F. y Bocco, G., (2003). *Los sistemas de información geográfica y la percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales.* Gaceta Ecológica, junio-septiembre, número 068. Instituto Nacional de Ecología. Distrito Federal, México. pp. 43-54.

Ruberto, A., Depettris, C., Pilar, J., Prieto, A., Gabazza, S., Zárata, M., (2006). *Impacto hidrológico por incremento de las áreas impermeables en cuencas urbanas, Subcuenca Cisterna, Resistencia, Chalco*. Universidad Nacional del Nordeste, Argentina. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2006. Resumen T-054.

Rubio-Vega, H. F., (2009). *La influencia de la cubierta boscosa en la severidad de respuesta de las cuencas ante la precipitación*. III Seminario Taller de la Red Mexicana de Ciudades hacia la Sustentabilidad Xalapa. Xalapa, Veracruz, México.

Schumm, S.A., (1980). *Some applications of the concept of geomorphic thresholds*. En *Thresholds in Geomorphology* (D.A. Coates & J.D. Vitek, eds.). Allen & Unwin, London, página 472-485.

Y. Lee, Z. Li and Y. Li., (2000). *Taxonomy of space tessellation*. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. The Netherlands. Vol. 55, pp 139-149. 2000.*

Anexos

DECRETO QUE DECLARA PARQUE NACIONAL "CUMBRES DE MONTERREY", LOS TERRENOS QUE RODEAN A DICHA POBLACIÓN.

24-11-1939

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.-
Presidencia de la República.

LAZARO CARDENAS, Presidente Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, a
sus habitantes, sabed: ·

Que en uso de las facultades que me confieren los artículos 22 y 41 de la Ley Forestal de
5 de abril de 1926 y atendiendo a lo dispuesto en los artículos 39, 47 y 48 del Reglamento
de dicha Ley, y

CONSIDERANDO que las montañas culminantes del Territorio Nacional, que forman la
división de sus principales valles ocupados por ciudades populosas y que, a la vez,
constituyen la división de las cuencas hidrográficas que por su extensión contribuyen de
manera considerable a la alimentación de las aguas de los ríos, formación de manantiales
y lagunas de los propios valles, manteniendo constante su régimen hidráulico, si están
cubiertas de vegetación forestal, como deben estarlo, para evitar la erosión de sus terrenos
en declive y para mantener el equilibrio climático de las poblaciones que como la ciudad
de Monterrey, cuenta con un clima riguroso, con variaciones frecuentes, que es necesario
atenuar para asegurar la buena salud de sus habitantes, para cuyo objeto es necesario que
las montañas culminantes que rodean dicha población sean protegidas de manera eficaz
en sus bosques y pastos y yerbales;

CONSIDERANDO que el río de Santa Catarina, del Estado de Nuevo León, es una
corriente de carácter permanente que recibe sus aguas de manantiales que afloran en
diferentes cañadas, cruzando una serie de valles escalonados, limitados por acantilados o
vertientes de una pendiente considerable, que se ligan por cañones de anchura variable y
registrándose temporalmente copiosas lluvias sobre la elevada sierra de Santa Catarina,

dando lugar a crecientes que descargan sobre el mencionado río en corto tiempo, volúmenes de agua considerables, dando origen a desbordamientos frecuentes que inundan gran parte de la zona urbanizada de la ciudad de Monterrey; el Departamento Forestal y de Caza y Pesca, basándose en los estudios técnicos llevados a cabo en la región, considera de urgente necesidad la construcción de obras destinadas a corregir la torrencialidad del mencionado río de Santa Catarina y asegurar de esta manera que su régimen hidráulico sea regular y constante, poniendo fin al grave peligro de las inundaciones;

CONSIDERANDO que la misma belleza natural de estas montañas, y la de su flora y fauna, constituyen un atractivo poderoso para el desarrollo del turismo, ya que se cuenta con la carretera nacional México - Laredo y algunos caminos secundarios, así como senderos, que permiten el acceso del turismo a los diferentes lugares de las mencionadas montañas que rodean a la ciudad de Monterrey;

CONSIDERANDO que es necesario asegurar por todos los medios posibles la conservación de la vegetación que actualmente cubre los terrenos montañosos a que se ha hecho referencia y además restituir mediante trabajos de repoblación el arbolado que ha desaparecido en amplias zonas dentro de la Cuenca Hidrográfica del río de Santa Catarina que forma, parte del río de San Juan, cuyas aguas, se almacenarán en la presa “El Azúcar”, Tamps., que actualmente se viene construyendo; he tenido a bien expedir el siguiente

DECRETO:

ARTICULO PRIMERO.

Se declara Parque Nacional, con el nombre de “Cumbres de Monterrey”, destinado a la conservación perenne de la flora y fauna comarcana, los terrenos que rodean a dicha población, los cuales están comprendidos dentro de los linderos siguientes:

Partiendo del paraje denominado Lazarillos, situado al S.W. del cerro de este nombre, el lindero sigue con rumbo NE a lo largo de la carretera México-Laredo, hasta llegar al paraje denominado Los Cristales en cuyo recorrido se deja comprendido el lugar denominado Juanuco o Villa de Santiago, situado en el kilómetro 960 de dicha carretera; de Los Cristales el lindero sigue con dirección N. E. y N. W. siguiendo las cumbres más altas de la serranía de la Silla, hasta llegar al poblado de Guadalupe; de aquí se continúa con rumbo N.E., hasta llegar al paraje Santa Rosa, que es la confluencia de la carretera México - Laredo con el río Pesquería; de Santa Rosa, el lindero sigue con dirección W y sigue el cauce del río de Pesquería hasta llegar al cerro del Fraile; de este cerro se continúa con rumbo SW, siguiendo el cauce del río de Los Muertos, hasta llegar al paraje denominado Los Muertos; de este punto el lindero sigue con rumbo S. E., siguiendo el

límite de los Estados de Nuevo León y Coahuila, hasta llegar al paraje denominado La Camotera, situado hacia el S. E., de la Laguna de Sánchez, de este lugar la línea sigue con rumbo S. E., hasta llegar al paraje denominado Potrero Redondo, de aquí la línea cambia con dirección N. E., tocando Las Adjuntas, hasta llegar a Lazarillos que fue el punto de partida.

ARTICULO SEGUNDO.

Los trabajos de corrección torrencial y de regularización de las corrientes que tienen nacimiento dentro de este Parque Nacional, se atenderán en cooperación de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, del Departamento Forestal y de Caza y Pesca y del Comité Impulsor del Parque

Nacional “Cumbres de Monterrey”.

ARTICULO TERCERO.

El Departamento Forestal y de Caza y Pesca, tendrá bajo su dominio la administración y “gobierno de” dicho Parque Nacional, con la intervención de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, respecto a los gastos y productos que el mencionado gobierno y administración ocasionen; quedando excluidos del Parque Nacional, las zonas urbanizadas, los cultivos agrícolas ya establecidos, siempre que no tengan una pendiente mayor de diez por ciento y los aprovechamientos mineros. Las explotaciones del turismo ya establecidas por particulares, quedarán sujetas a la reglamentación correspondiente que dicte el propio Departamento Forestal y de Caza y Pesca para los Parques Nacionales y muy especialmente para el de “Cumbres de Monterrey”.

ARTICULO CUARTO.

Teniendo en cuenta las razones expuestas en los considerandos del presente Decreto, no se harán dotaciones ejidales en los terrenos comprendido dentro de los linderos citados en el artículo primero, con fundamento en el acuerdo presidencial de fecha 28 de abril de 1937.

ARTICULO QUINTO.

Los terrenos comprendidos dentro de los linderos fijados en el artículo primero del presente

Decreto, quedarán en posesión de sus respectivos dueños, en tanto cumplan con las disposiciones que sobre el particular dicte el Servicio Forestal en beneficio del Parque Nacional mencionado.

TRANSITORIO:

ARTICULO UNICO.

El presente Decreto entrará en vigor tres días después de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

En cumplimiento de lo dispuesto por la fracción I del artículo 89 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, y para su debida publicación y observancia, promulgo el presente Decreto en la residencia del Poder Ejecutivo Federal, a los cuatro días del mes de octubre de mil novecientos treinta y nueve.- Lázaro Cárdenas.- Rúbrica.- El Jefe del Departamento Forestal y de Caza y Pesca, Miguel A. de Quevedo.- Rúbrica.- Al C. Lic. Ignacio García Téllez, Secretario de Gobernación. - Presente.